

quilômetros antes de chegar à Terra, comparado com a distância quando os dois planetas estavam mais próximos. Se a luz tinha uma velocidade finita, então levaria mais tempo para cobrir essa distância extra, dando a impressão de que Io estava atrasada. Resumindo, Römer afirmou que Io era perfeitamente regular, e sua irregularidade aparente era uma ilusão provocada pelos tempos diferentes que a luz de Io levava para cobrir distâncias diferentes até a Terra.

Para ajudar a entender o que estava acontecendo, imagine que você está próximo de um canhão que é disparado exatamente a cada hora. Você ouve

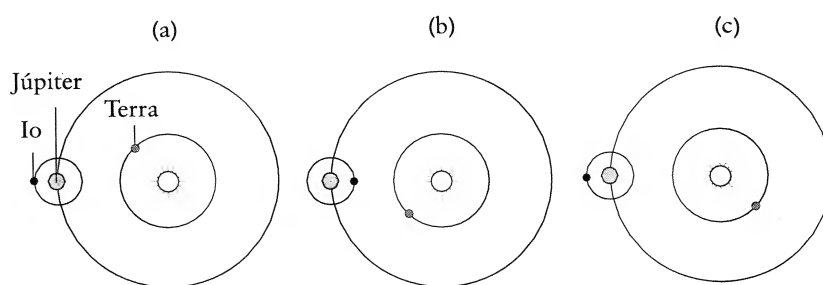


Figura 19 Ole Römer mediu a velocidade da luz ao estudar os movimentos da lua Io de Júpiter. Esses diagramas apresentam uma ligeira variação em relação ao método real. No diagrama (a), Io está a ponto de desaparecer por trás de Júpiter; no diagrama (b), Io já completou meia revolução, de modo que está na frente de Júpiter. Enquanto isso, Júpiter quase não se moveu, mas a Terra movimentou-se de modo significativo porque a Terra orbita o Sol 12 vezes mais rapidamente do que Júpiter. Um astrônomo na Terra mede o tempo que se passou entre (a) e (b), ou seja, o tempo que levou para Io completar metade de uma revolução.

No diagrama (c), Io já completou outra meia revolução de volta para onde começou, enquanto a Terra se moveu para uma posição ainda mais afastada de Júpiter. O astrônomo mede o tempo entre (b) e (c), que deveria ser o mesmo que entre (a) e (b), mas de fato se revela significativamente mais longo. A razão para o tempo extra é que a luz de Io leva um pouco mais de tempo para cobrir a distância extra até a Terra no diagrama (c), porque a Terra agora está mais afastada de Júpiter. O atraso no tempo e a distância entre a Terra e Júpiter podem ser usados para estimar a velocidade da luz. (A distância percorrida pela Terra nesses diagramas foi exagerada porque Io orbita Júpiter em menos de dois dias. A posição de Júpiter também mudaria e complicaria a questão.)

o canhão e aciona o...
dirigindo em uma lin...
tros de distância quan...
um fraco estampido. I...
você perceberá ter ou...
ro e não sessenta min...
sessenta minutos entre...
disparo leva para cobr...
perfeitamente regular...
seis minutos devido à...

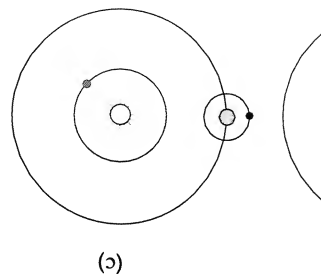
Depois de passar tr...
relativas de Terra e Jú...
luz seria 190.000 km/h...
mas o que interessa é q...
dade finita e deduziu u...
debate fora resolvido, e...

Contudo Cassini fi...
tado, porque ele não...
Römer fossem basead...
isso Cassini tornou-se u...
ria que ainda preferia a...
não desistiu e usou sua...
de Io, em 9 de novemb...
relação ao horário prev...
não disse?”, o eclipse de...
mostrara que estava cer...
dida da velocidade da l...

A previsão do eclips...
todas. E, no entanto, con...
centro, fatores além da p...
so científico. Cassini ocu...
mais do que ele, e assim...
se manter vivo, ele cons...
Römer de que a luz tinh...

...ado com a distância quando
a luz tinha uma velocidade
essa distância extra, dando a
indo, Römer afirmou que Io
ade aparente era uma ilusão
de Io levava para cobrir dis-

ecendo, imagine que você está
mente a cada hora. Você ouve



studar os movimentos da lua Io de
ção em relação ao método real. No
de Júpiter; no diagrama (b), Io já
de Júpiter. Enquanto isso, Júpiter
modo significativo porque a Terra
r. Um astrônomo na Terra mede o
po que levou para Io completar
volução de volta para onde come-
inda mais afastada de Júpiter. O
ser o mesmo que entre (a) e (b),
razão para o tempo extra é que a
a distância extra até a Terra no
de Júpiter. O atraso no tempo e a
a estimar a velocidade da luz. (A
agerada porque Io orbita Júpiter
mudaria e complicaria a questão.)

o canhão e aciona o seu cronômetro e então começa a se afastar no carro, dirigindo em uma linha reta a 100 km/h, de modo que está a cem quilômetro de distância quando o canhão dispara de novo. Você para o carro e ouve um fracasso estampido. E, como o som viaja a aproximadamente 1.000 km/h, você perceberá ter ouvido o segundo disparo 66 minutos depois do primeiro e não sessenta minutos. Os 66 minutos são a soma do intervalo real de sessenta minutos entre os disparos e os seis minutos que o som do segundo disparo leva para cobrir os cem quilômetros e chegar até você. O canhão é perfeitamente regular em seus disparos, mas você experimenta um atraso de seis minutos devido à velocidade finita do som e sua nova posição.

Depois de passar três anos analisando as observações de Io e as posições relativas de Terra e Júpiter, Römer conseguiu estimar que a velocidade da luz seria 190.000 km/h. De fato, o valor verdadeiro é quase 300.000 km/s, mas o que interessa é que Römer tinha mostrado que a luz tinha uma velocidade finita e deduziu um valor que não era loucamente impreciso. O antigo debate fora resolvido, afinal.

Contudo Cassini ficou aborrecido quando Römer anunciou seu resultado, porque ele não recebera reconhecimento, embora os cálculos de Römer fossem baseados, em sua maior parte, nas suas observações. Por isso Cassini tornou-se um duro crítico de Römer e um porta-voz da maioria que ainda preferia a teoria de que a velocidade da luz era infinita. Römer não desistiu e usou sua velocidade da luz finita para prever que um eclipse de Io, em 9 de novembro de 1676, aconteceria dez minutos atrasado em relação ao horário previsto por seus opositores. Num caso clássico de "eu não disse?", o eclipse de Io aconteceu vários minutos fora do horário. Römer mostrou que estava certo e publicou outro trabalho confirmando sua medida da velocidade da luz.

A previsão do eclipse deveria ter resolvido a questão de uma vez por todas. E, no entanto, como vimos no caso do debate sobre o Sol e a Terra no centro, fatores além da pura lógica e da razão as vezes influenciam o consenso científico. Cassini ocupava uma posição mais elevada que Römer e viveu mais do que ele, e assim, através de manobras políticas e simplesmente por se manter vivo, ele conseguiu mudar as opiniões contra o argumento de Römer de que a luz tinha uma velocidade finita. Algumas décadas depois,

contudo, Cassini e seus colegas foram substituídos por uma nova geração de cientistas, que examinaram a conclusão de Römer de modo imparcial, fizeram seus próprios testes e a aceitaram.

Uma vez estabelecido que a velocidade da luz era finita, os cientistas se voltaram para outro mistério em relação a sua propagação: qual era o meio responsável pelo deslocamento da luz? Os cientistas sabiam que o som pode viajar em uma variedade de meios — os seres humanos, quando falam, enviam ondas sonoras através de um meio gasoso, o ar; as baleias cantam umas para as outras usando a água líquida como meio, e podemos ouvir o bater dos nossos dentes através do meio sólido dos nossos ossos entre os dentes e os ouvidos. A luz também pode viajar através de gases, líquidos e sólidos, como o ar, a água e o vidro, mas havia uma diferença fundamental entre luz e som, como fora demonstrado por Otto von Guericke, o burgomestre de Magdenburgo que realizara uma série de experiências famosas em 1657.

Von Guericke tinha inventado a primeira bomba de vácuo e conseguiu explorar as estranhas propriedades do vácuo. Em uma experiência, ele colocou dois grandes hemisférios de latão unidos frente a frente e sugou o ar de dentro deles de modo que se comportassem como duas ventosas excepcionalmente poderosas. Então, numa maravilhosa exibição de espetáculo científico, ele demonstrou que dois conjuntos de oito cavalos não eram capazes de separar os dois hemisférios.

Numa experiência ainda mais elegante, Von Guericke retirou o ar de uma jarra de vidro contendo uma campainha. À medida que o ar era sugado, a platéia não conseguia mais ouvir a campainha tocando, mas podia ver o martelinho golpeando a sineta. Estava claro, portanto, que o som não podia viajar através do vácuo. Ao mesmo tempo, a experiência mostrou que a luz podia viajar pelo vácuo, porque a campainha não desapareceu e o interior da jarra não ficou escuro. De modo estranhíssimo, se a luz podia viajar através do vácuo então alguma coisa podia viajar através do nada.

Confrontados com esse aparente paradoxo, os cientistas começaram a se perguntar se o vácuo era de fato vazio. O ar fora retirado da jarra, mas talvez ainda existisse alguma coisa lá dentro, algo que fornecera um meio para a transmissão da luz. No século XIX, os cientistas tinham proposto que todo o universo era permeado por uma substância que chamaram de *éter*

luminescente, que, de alguma forma, produzia luz. Essa substância hipotética era notável, como lembrou o

Agora, o que é o *éter* luminoso? É mais densa do que o ar — muito densa. Podemos ter alguma ideia de sua rigidez real, com grande rigidez para vibrar 400 bilhões de vezes por segundo, densidade que não opõe resistência ao que através dela.

Em outras palavras, o *éter* luminoso era insubstancial. Era também invisível. Estava em toda parte ao redor de nós porque ninguém jamais conseguiu detectá-lo. Assim, disso, Albert Michelson, o maior físico da América, achava que podia provar sua existência.

Os pais judeus de Michelson em 1854, quando ele tinha dez anos, e estudou em San Francisco, nos Estados Unidos, onde se graduou em física. O que ele fez primeiro em óptica. O que ele fez na Academia: “Se no futuro as descobertas científicas e mais ao conhecimento em que saberá o suficiente para Michelson, de modo inteligente, tempo integral, e, em 1877, que a velocidade da luz era conhecida do que qualquer e

Então, em 1880, Michelson que provasse a existência de um único raio de luz que viajava na mesma direção

luminiscente, que, de alguma forma, agia como meio para o transporte da luz. Essa substância hipotética necessariamente teria algumas propriedades notáveis, como lembrou o grande cientista vittoriano lorde Kelvin:

Agora, o que é o éter luminiscente? É uma matéria prodigiosamente densa do que o ar — milhões e milhões de vezes menos densa do que o ar. Podemos ter alguma idéia de seus limites. Acreditamos que é uma coisa real, com grande rigidez em comparação com sua densidade: pode ser feita para vibrar 400 bilhões de vezes por segundo; e, no entanto, ser de uma densidade que não opõe a menor resistência a nenhum corpo que se desloque através dela.

Em outras palavras, o éter era incrivelmente forte e no entanto estranhamente insubstancial. Era também transparente, sem atrito e quimicamente inerte. Estava em toda parte ao nosso redor, e no entanto era difícil de identificar porque ninguém jamais o viu, agarrara ou dera de cara com ele. Apesar disso, Albert Michelson, o primeiro americano a ganhar o prêmio Nobel de Física, achava que podia provar a sua existência.

Os pais judeus de Michelson tinham fugido das perseguições na Prússia em 1854, quando ele tinha apenas dois anos de idade. Ele passou a infância e estudou em San Francisco antes de entrar para a Academia Naval dos Estados Unidos, onde se graduou em 25º lugar em conhecimentos navais e primeiro em óptica. O que provocou a seguinte observação do superintendente da Academia: "Se no futuro o senhor der menos atenção a essas coisas científicas e mais ao conhecimento da artilharia naval, pode chegar uma ocasião em que saberá o suficiente para ser de alguma utilidade ao seu país". Michelson, de modo inteligente, passou a dedicar-se à pesquisa óptica em tempo integral, e, em 1878, com apenas 25 anos de idade, ele determinou que a velocidade da luz era de 299.910 ± 50 km/s, o que era vinte vezes mais preciso do que qualquer estimativa anterior.

Então, em 1880, Michelson projetou uma experiência que ele torcia para provasse a existência do éter condutor da luz. Seu equipamento dividia um único raio de luz em dois raios separados, perpendiculares. Um raio viajava na mesma direção do movimento da Terra através do espaço,

idos por uma nova geração de

mer de modo imparcial, fize-

luz era finita, os cientistas se

a propagação: qual era o meio

ntistas sabiam que o som pode

s humanos, quando falam, en-

o, o ar; as baleias cantam umas

rio, e podemos ouvir o bater

ossos ossos entre os dentes e

is de gases, líquidos e sólidos,

diferença fundamental entre luz

n Guericke, o burgomestre de

eriências famosas em 1657.

a bomba de vácuo e conseguiu

Em uma experiência, ele colo-

frete a frente e sugou o ar de

como duas ventosas excipio-

sa exibição de espetáculo cien-

oito cavalos não eram capazes

Von Guericke retirou o ar de

À medida que o ar era sugado,

portanto, que o som não podia

experiência mostrou que a luz

a não desapareceu e o interior

imo, se a luz podia viajar atra-

através do nada.

o, os cientistas começaram a se

ra retirado da jarra, mas talvez

que fornecera um meio para a

stas tinham proposto que todo

ância que chamaram de *éter*

enquanto o outro se movia numa direção em ângulo reto com o primeiro. Ambos percorriam uma distância igual, eram refletidos por espelhos e então voltavam a se combinar num único feixe. Ao se combinarem, sofriam um processo conhecido como interferência, que permitia que Michelson comparasse os dois raios de luz e identificasse qualquer discrepância nos tempos de percurso.

Michelson sabia que a Terra viaja a aproximadamente 100.000 km/h na sua trajetória em torno do Sol, o que presumivelmente significava que ela passaria através do éter com essa velocidade. E, como se supunha que o éter fosse um meio estável, que permeava o universo, a passagem da Terra através do espaço deveria criar uma espécie de *vento de éter*. Isso seria semelhante ao falso vento que você sente se andar num carro sem capota, em alta velocidade, num dia calmo — não está na verdade ventando, mas parece que está devido ao seu movimento. Portanto, se a luz fosse transportada no éter e por meio dele, sua velocidade seria afetada pelo vento de éter. Mais especificamente, na experiência de Michelson um raio de luz estaria viajando ao vento do éter e contra ele, e assim deveria ter sua velocidade afetada de modo significativo enquanto o outro raio estaria atravessando o vento de éter lateralmente e sua velocidade seria menos afetada. Se os tempos de percurso dos dois raios fossem diferentes, então Michelson conseguiria usar essa discrepância como uma forte evidência a favor da existência do éter.

A experiência para detectar o vento de éter era tão complexa que Michelson explicou seus termos na forma de um enigma.

Suponha que temos um rio com 100 pés (30 metros) de largura e dois nadadores que nadam com a mesma velocidade, digamos 5 pés por segundo (1,5 metro por segundo). O rio flui com uma corrente estável de 3 pés (90 centímetros por segundo). Os nadadores disputam do seguinte modo: ambos partem de um mesmo ponto em uma das margens. Um deles nada diretamente através do rio para o ponto mais próximo da margem oposta, então vira e nada de volta. O outro fica num dos lados do rio, nadando rio acima por uma distância (medida ao longo da margem) igual à largura do rio, e então volta ao ponto de partida. Qual deles chega primeiro? [Ver a solução na figura 20.]

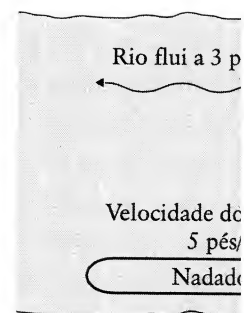


Figura 20 Albert Michelson viaja do éter. Os dois nadadores nadando-se em direções perpendiculares. Um deles nada diretamente através da corrente — o vento do éter enquanto o outro nada lateralmente. O vencedor de uma corrida entre os dois nadadores que podem nadar com a mesma velocidade é o nadador A, que nada rio acima e depois volta. Ele leva dois trechos de 100

O tempo que o nadador A leva para nadar rio acima e depois voltar é de 62,5 segundos. Nadando a favor da corrente, assim ele leva 12,5 segundos para percorrer os 200 pés e 62,5 segundos para nadar os 200 pés é de 62,5

O nadador B, ao nadar rio acima e depois voltar, leva mais tempo. O teorema de Pitágoras mostra que ele terá um componente rio acima e depois volta. Ele leva 12,5 segundos para nadar rio acima e depois volta. Ele leva 12,5 segundos para nadar 200 m

Embora ambos os nadadores tenham a mesma velocidade, o nadador que cruza a corrente leva mais tempo. Depois contra a corrente, ele se deslocasse através do vento de éter e se deslocasse primeiro. A experiência para verificar se

ângulo reto com o primeiro. Ao se combinarem, sofriam refletidos por espelhos e en-

que permitia que Michelson

e qualquer discrepância nos

nadamamente 100.000 km/h na

ivelmente significava que ela

, como se supunha que o éter

so, a passagem da Terra atra-

de éter. Isso seria semelhante-

m carro sem capota, em alta

ide ventando, mas parece que

uz fosse transportada no éter

elo vento de éter. Mais espe-

er sua velocidade afetada de

aria atravessando o vento de

os afetada. Se os tempos de

o Michelson conseguiria usar

favor da existência do éter.

éter era tão complexa que

um enigma.

tros) de largura e dois nada-
mos 5 pés por segundo (1,5
ite estável de 3 pés (90 cen-
do seguinte modo: ambos
s. Um deles nada diretamen-
nadando rio acima por uma
argura do rio, e então volta
[Ver a solução na figura 20.]

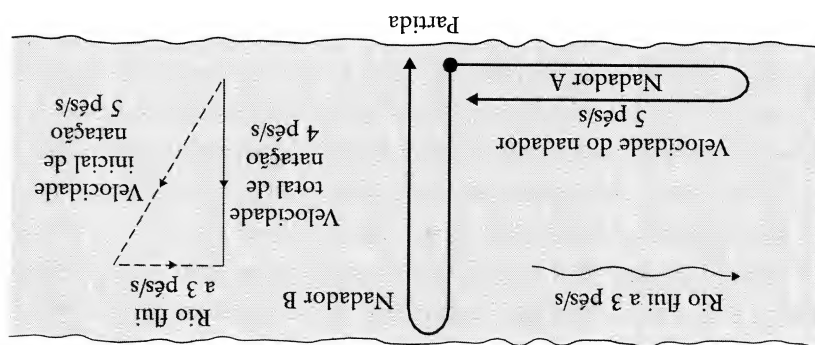


Figura 20 Albert Michelson usou este problema de natação para explicar sua experiência do éter. Os dois nadadores desempenham o mesmo papel de dois raios de luz, movendo-se em direções perpendiculares e então retornando, ambos, ao mesmo ponto de partida. Um deles nada primeiro a favor e depois contra a correnteza, enquanto o outro nada atrás da corrente — exatamente como um raio de luz viaja junto e então contra o vento do éter enquanto o outro o atravessa. O objetivo do problema é determinar o vencedor de uma corrida em uma distância de 200 pés (60 metros) entre os dois nadadores que podem nadar com uma velocidade de 5 pés por segundo na água parada. O nadador A vai rio acima num percurso de 100 pés (30 metros) e depois nada a favor da corrente outros 100 pés, enquanto o nadador B atravessa o rio e volta, também percorrendo dois trechos de 100 pés. O rio tem uma correnteza de 3 pés/s.

O tempo que o nadador A leva para ir rio acima e então rio abaixo é fácil de analisar. Nadando a favor da correnteza, o nadador tem uma velocidade total de 8 pés/s (5 + 3 pés/s), assim ele leva 12,5 segundos para percorrer os 100 pés. Ao voltar contra a correnteza, ele nada com uma velocidade de apenas 2 pés/s (5 - 3 pés/s), assim ele leva 50 segundos para percorrer este outro trecho de 100 pés. Portanto, seu tempo total para nadar os 200 pés é de 62,5 segundos.

O nadador B, ao atravessar o rio, tem que nadar num ângulo para compensar a correnteza. O teorema de Pitágoras nos diz que, se ele nadar a 5 pés/s no ângulo correto, terá um componente rio acima de 3 pés/s que cancela o efeito da corrente e um componente transversal de 4 pés/s. Com isso ele nada os primeiros 100 pés em apenas 25 segundos e então leva outros 25 segundos para voltar, levando um tempo total de 50 segundos para nadar 200 metros.

Embora ambos os nadadores possam nadar com a mesma velocidade em água parada, o nadador que cruza a correnteza vence a corrida contra o nadador que vai a favor e depois contra a correnteza. Por isso, Michelson suspeitava de que um raio de luz que se deslocasse através do vento do éter teria um tempo de viagem mais curto do que um raio que se deslocasse primeiro a favor e depois contra o vento do éter. Ele projetou uma experiência para verificar se isso acontecia.

Michelson investiu nas melhores fontes de luz e espelhos disponíveis para sua experiência e tomou todas as precauções possíveis na montagem do aparelho. Tudo foi cuidadosamente alinhado, nivelado e polido. Para aumentar a sensibilidade de seu equipamento e minimizar os erros, ele fez a montagem principal flutuar num grande banho de mercúrio, isolando-a, portanto, de fatores externos, como os tremores provocados por passos distantes. O objetivo de sua experiência era provar a existência do éter, e Michelson fez tudo o que podia para maximizar a chance de sua detecção. E por esse motivo ficou atônito com a completa e total incapacidade de detectar qualquer diferença nos tempos de chegada dos dois raios perpendiculares. Não havia o menor sinal de éter. Era um resultado chocante.

Desesperado para descobrir o que saíra errado, Michelson recrutou o químico Edward Morley. Juntos, eles reconstruíram o aparelho, aperfeiçoando cada peça de equipamento para tornar a experiência ainda mais sensível, e então voltaram a fazer as medições. Finalmente, em 1887, depois de passarem sete anos repetindo a experiência, eles publicaram seus resultados definitivos. Não havia sinal de éter. Portanto, eles foram forçados a concluir que o éter não existia.

Levando em conta seu conjunto ridículo de propriedades — supunha-se que fosse a substância menos densa e mais rígida do universo —, não devia causar surpresa que o éter fosse uma ficção. Não obstante, os cientistas o abandonaram com grande relutância, porque fora o único meio concebível para explicar como a luz era transmitida. Até mesmo Michelson teve problemas para aceitar sua própria conclusão. Ele certa vez se referiu ao “velho e amado éter, que agora foi abandonado, embora eu, pessoalmente, ainda me agarre um pouco a ele”.

A crise da não-existência do éter foi aumentada porque se supunha que ele fosse responsável pelo transporte dos campos elétricos e magnéticos, assim como da luz. A terrível situação foi bem resumida pelo escritor científico Banesh Hoffmann:

Primeiro tínhamos o éter luminescente
Depois tínhamos o éter eletromagnético,
E agora não temos nenhum dos dois.

Assim, no fim do século XIX. Ironicamente, ele tinha muitas bem-sucedidas, relacionadas com a existência do éter, não que a luz, de algum modo, fosse desprovido de qualquer coisa.

A conquista de Michelson foi especializada e anos de trabalho solitário, sem saber da existência do éter, mas baseado no trabalho de Albert Einstein.

As experiências

As proezas juvenis de Einstein voltaram a brotar em grande número ao seu redor. Ao longo da vida, ele nunca parou de se matricular em cursos. Mesmo na idade de cinco anos, ele tinha um conhecimento de uma bússola invisível que puxava a agulha da natureza do magnetismo, e a insaciável de Einstein para a física.

Como Einstein disse em uma entrevista: “Sou apenas um jovem, mas a coisa mais importante é não parar de pensar sobre a própria razão de existir. Não podemos resolver os mistérios da eternidade. Já é bastante se alguém tem a coragem de pensar a cada dia”. O prático: “Acho que os físicos devem continuar a curiosidade e mantê-la sua curiosidade”.

Assim, no fim do século XIX, Michelson provava que o éter não existia. Ironicamente, ele tinha construído sua carreira sobre uma série de experiências bem-sucedidas, relacionadas com a óptica, mas seu maior triunfo resultaria de uma experiência fracassada. Seu objetivo, o tempo todo, fora provar a existência do éter, não a sua ausência. Os físicos agora tinham que aceitar que a luz, de algum modo, podia viajar através do vácuo — através de espaço desprovido de qualquer meio.

A conquistista de Michelson exigira equipamento experimental caro e especializado e anos de esforços. Mais ou menos na mesma época, um jovem solitário, sem saber da conquista de Michelson, também concluiu que o éter não existia, mas baseado em argumentos puramente teóricos. Seu nome era Albert Einstein.

As experiências mentais de Einstein

As proezas juvenis de Einstein e mais tarde sua genialidade plenamente desenvolvida brotaram em grande parte de sua imensa curiosidade a respeito do mundo ao seu redor. Ao longo de sua carreira prolífica, revolucionária e visionária, ele nunca parou de se maravilhar com as leis subjacentes que regem o universo. Mesmo na idade de cinco anos, Einstein ficou fascinado pelo misterioso funcionamento de uma bússola que lhe fora dada por seu pai. O que seria a força invisível que puxava a agulha e por que ela apontava sempre para o norte? A natureza do magnetismo o fascinou pela vida inteira, o que era típico do apetite insaciável de Einstein para explorar fenômenos aparentemente triviais. Como Einstein disse ao seu biógrafo Carl Seilig, "eu não possuo talentos especiais. Sou apenas apaixonadamente curioso". Ele também escreveu: "O mais importante é não parar de fazer perguntas. A curiosidade tem sua própria razão de existir. Não podemos deixar de nos admirar quando contemplamos os mistérios da eternidade, da vida, da maravilhosa estrutura da realidade. Já é bastante se alguém tentar compreender apenas um pouquinho desse mistério a cada dia". O prêmio Nobel Isidor Isaac Rabi reforçou esse ponto de vista: "Acho que os físicos são os Peter Pan da raça humana. Eles nunca crescem e mantêm sua curiosidade".

es de luz e espelhos disponíveis na montagem do
do, nivelado e polido. Para au-
o e minimizar os erros, ele fez a
banho de mercúrio, isolando-a,
nores provocados por passos dis-
provar a existência do éter, e
nizar a chance de sua detecção. E
ta e total incapacidade de detec-
ada dos dois raios perpendicular-
m resultado chocante.
a errado, Michelson recrutou o
uram o aparelho, aperfeiçoando
perência ainda mais sensível, e
nte, em 1887, depois de passa-
publicaram seus resultados defi-
s foram forçados a concluir que
de propriedades — supunha-se
gida do universo —, não devia
. Não obstante, os cientistas o
; fora o único meio concebível
mesmo Michelson teve proble-
erta vez se referiu ao "velho e
ra eu, pessoalmente, ainda me
entrada porque se supunha que
mpos elétricos e magnéticos,
resumida pelo escritor cienti-

incentive
magnético,
os dois.

Nesse aspecto, Einstein tinha muito em comum com Galileu. Einstein escreveu uma vez: “Estamos na situação de uma criança pequena que entra em uma imensa biblioteca cujas paredes estão cobertas até o teto com livros em muitos idiomas diferentes”. Galileu fez uma analogia semelhante, mas ele condensou toda a biblioteca da natureza em um único grande livro e uma única linguagem que sua curiosidade o compelia a decifrar: “Ele está escrito na linguagem da matemática e as letras são triângulos, círculos e outras figuras geométricas, sem as quais é humanamente impossível entender uma única palavra. E sem elas ficamos vagando por um labirinto escuro”.

Galileu e Einstein também estão unidos por um interesse comum no princípio da relatividade. Galileu descobrira o princípio da relatividade, mas foi Einstein quem o explorou completamente. Numa forma simples, a relatividade de Galileu diz que todo movimento é relativo, o que significa que é impossível saber se estamos em movimento sem recorrer a uma estrutura de referência externa. Galileu declarou vividamente o que ele queria dizer por relatividade no *Diálogo*:

Tranque-se com um amigo na cabine principal sob o convés de um navio e leve com você algumas moscas, borboletas e outros pequenos animais voadores. Tenha também um aquário com peixes dentro e pendure uma garrafa que goteje sobre uma bacia embaixo dela. Com o navio parado, observe cuidadosamente como os pequenos animais voam com igual velocidade em todos os lados da cabine; como os peixes nadam indiferentemente em todas as direções e como as gotas caem na bacia embaixo. E, ao jogar alguma coisa para seu amigo, você não precisa atirá-la com mais força em uma direção ou na outra, a distância é igual. Se saltar com os pés unidos, vai percorrer distâncias iguais em todas as direções.

Quando tiver observado tudo isso com cuidado... faça com que o navio navegue com a velocidade que desejar, desde que o movimento seja uniforme e não flutuante desse modo ou daquele. Vai descobrir que não há nenhuma mudança nos efeitos citados, nem poderá dizer, a partir deles, se o navio está se movendo ou parado.

Em outras palavras, enquanto estiver se movendo a uma velocidade constante e numa linha reta, não há nada que possa fazer para medir a velocidade

de deslocamento, ou p
tece porque tudo ao se
movimentos (por exer
nuam inalterados, a de
bém o cenário de Galil
de modo que você está
tar algum movimento
referência. Se você se i
pões nos ouvidos e os c
me, será muito difícil c
está parado na estação,

Essa foi uma das m
vencer os astrônomos c
críticos anticopernican
redor do Sol porque se
ou como o solo sendo j
ce. Contudo, o princíp
enorme velocidade da
atmosfera, também se j
Uma Terra móvel é efet
se ela fosse estática.

De modo geral, a t
pode afirmar se estamos
imóveis. Isso é verdade
olhos e os ouvidos tam
quer outro modo.

Sem saber que Mich
tia, Einstein usou o pr
explorar a possível exis
de galileana no contex
como *experimento geda*
se de uma experiência p
do físico, em geral porq
realizar no mundo real.

de deslocamento, ou para dizer se está realmente em movimento. Isso acontece porque tudo ao seu redor se move com a mesma velocidade, e todos os movimentos (por exemplo, garrafas gotejando, borboletas voando) continuam inalterados, a despeito de você estar em movimento ou parado. Também o cenário de Galileu acontece "na cabine principal, debaixo do convés", de modo que você está isolado, o que elimina qualquer esperança de detectar algum movimento relativo recorrendo-se a uma estrutura externa como referência. Se você se isolar de modo semelhante, ficando sentado com tapetes nos ouvidos e os olhos fechados, dentro de um trem numa linha unifórme, será muito difícil dizer se o trem está correndo a 100 km/h ou se ainda está parado na estação, o que é outra demonstração da relatividade galileana. Essa foi uma das maiores descobertas de Galileu, porque ajudou a convencer os astrônomos céticos de que a Terra de fato gira ao redor do Sol. Os críticos anticopernicanos argumentavam que a Terra não podia se mover ao redor do Sol porque sentiríamos esse movimento como um vento constante ou como o solo sendo puxado sob nossos pés, o que claramente não acontece. Contudo, o princípio da relatividade de Galileu diz que não sentimos a enorme velocidade da Terra através do espaço porque tudo, do solo à atmosfera, também se move pelo espaço com a mesma velocidade que nós. Uma Terra móvel é efetivamente o mesmo ambiente que experimentaríamos se ela fosse estática.

De modo geral, a teoria da relatividade de Galileu declara que não se pode afirmar se estamos nos movendo com rapidez, lentamente ou se estamos imóveis. Isso é verdade se você estiver isolado na Terra, ou num trem com os olhos e os ouvidos tapados, ou isolado de uma referência externa de qualquer outro modo.

Sem saber que Michelson e Morley tinham provado que o éter não existia, Einstein usou o princípio da relatividade de Galileu como base para explorar a possível existência do éter. Em especial, ele recorreu à relatividade galileana no contexto de um *experimento mental*, também conhecido como *experimento gedanken* (da palavra alemã para "pensamento"). Trata-se de uma experiência puramente imaginária que acontece apenas na cabeça do físico, em geral porque envolve um procedimento que não é prático de se realizar no mundo real. Embora seja uma construção puramente teórica, um

num com Galileu. Einstein
criança pequena que entra
bertas até o teto com livros
analogia semelhante, mas
m único grande livro e uma
a decifrar: "Ele está escrito
culos, círculos e outras figu-
possível entender uma uni-
abirinto escuro".
r um interesse comum no
ncípio da relatividade, mas
uma forma simples, a rela-
lativo, o que significa que é
recorrer a uma estrutura de
o que ele queria dizer por

do... faça com que o navio
o movimento seja uniforme
obrir que não há nenhuma
partir deles, se o navio está
idos, vai percorrer distân-
s força em uma direção ou
. E, ao jogar alguma coisa
diferentemente em todas as
m igual velocidade em to-
navio parado, observe cui-
ro e pendure uma garrafa
s pequenos animais voado-
b o convés de um navio e

do a uma velocidade cons-
zer para medir a velocidade

experimento mental pode, com frequência, levar a um profundo entendimento do mundo real.

Em uma experiência mental realizada em 1896, quando tinha apenas 16 anos de idade, Einstein imaginou o que aconteceria se ele pudesse viajar com a velocidade da luz enquanto segurava um espelho diante dele. Particularmente, imaginava se seria capaz de ver o próprio reflexo. A teoria vitoriana do éter o concebia como uma substância estática que permeava todo o universo. A luz era supostamente transportada pelo éter, assim isso implicava que ela se deslocava com a velocidade da luz (300.000 km/s) em relação ao éter. Na experiência mental de Einstein, ele, seu espelho e seu rosto, também viajavam pelo éter com a velocidade da luz. Portanto, a luz deveria deixar o rosto de Einstein e tentar viajar até o espelho em sua mão, mas nunca conseguiria deixar o seu rosto, e muito menos alcançar o espelho, porque tudo se movia com a velocidade da luz. E, se a luz não podia alcançar o espelho, então ela não seria refletida de volta e, conseqüentemente, Einstein não seria capaz de ver o próprio reflexo.

Esse cenário imaginário era chocante porque desafiava completamente o princípio da relatividade de Galileu, segundo o qual uma pessoa que se deslocasse a uma velocidade constante não conseguiria determinar se estava se movendo rapidamente, lentamente, para frente ou para trás — ou até se estava de fato se movendo. A experiência mental de Einstein implicava que ele saberia quando estava se movendo com a velocidade da luz porque o seu reflexo desapareceria.

O menino prodígio tinha feito uma experiência imaginária baseado num universo cheio de éter, e o resultado era paradoxal, porque contradizia o princípio de relatividade de Galileu. A experiência mental de Einstein pode ser encenada no cenário de Galileu, sob o convés do navio: o marinheiro saberia se seu navio estava se movendo com a velocidade da luz porque seu reflexo desapareceria. Contudo Galileu tinha declarado com firmeza que o marinheiro não conseguiria perceber se o navio estava em movimento.

Alguma coisa tinha que ceder. Ou a relatividade de Galileu estava errada, ou a experiência mental de Einstein tinha uma falha fundamental. No final, Einstein percebeu que sua experiência falhara porque era baseada num universo cheio de éter. Para resolver o paradoxo, concluiu que a luz não

viaja a uma velocidade fixa pelo éter e que o éter nem sabe o que é. Isso é exatamente o que Michelson descobriu.

Pode-se desconfiar de resultados experimentais, especialmente se a física é nova. Mas as experiências reais, com equipamentos reais, não são mentais. As experiências mentais estão nas mentes e é por isso que a experiência mental é mais confiável. Não obstante, a experiência mental de Einstein, quando jovem e, o que é mais importante, as implicações de um universo onde a velocidade da luz é constante.

A noção vitoriana do éter não é um texto adequado para o que estamos falando da velocidade da luz. Todos aceitam a velocidade constante, 300.000 km/s, em relação ao meio no qual se move. No sentido no universo vitoriano, onde tinham mostrado que não havia meio no qual viajar, o que é a velocidade da luz? A velocidade da luz é constante.

Einstein pensou na questão e, no fim, chegou a uma solução que foi muito da intuição. À primeira vista, depois ficaria provado que a luz se desloca a uma velocidade constante para o *observador*. Em outras palavras, a luz está sendo emitida, mas a velocidade da luz, que é de aproximadamente 299.792.458 m/s, é constante para a experiência diária das velocidades.

Imagine um garoto correndo a uma velocidade de 40 m/s. Vendo um objeto distante do garoto. Ele diz

viaja a uma velocidade fixa em relação ao éter, que a luz não é transportada pelo éter e que o éter nem mesmo existia. Sem que ele soubesse, era exatamete isso que Michelson e Morley já tinham descoberto.

Pode-se desconfiar do experimento mental um tanto tortuoso de Einstein, especialmente se a física é vista como uma disciplina que depende de experiências reais, com equipamentos verdadeiros e medições reais. De fato, experiências mentais estão nas fronteiras da física e não são totalmente confiáveis, e é por isso que a experiência real de Michelson e Morley foi tão importante. Não obstante, a experiência imaginária de Einstein demonstrara o brilho de sua mente jovem e, o que é mais importante, o pôs no rumo para abordar as implicações de um universo desprovido de éter e seu significado em termos da velocidade da luz.

A noção vitoriana do éter fora muito confortável, porque fornecia um contexto adequado para o que os cientistas queriam dizer quando falavam na velocidade da luz. Todos aceitavam que a luz se deslocava com uma velocidade constante, 300.000 km/s e todos presumiam que isso significava 300.000 km/s em relação ao meio no qual se deslocava, que se julgava ser o éter. Tudo fazia sentido no universo vitoriano cheio de éter. Mas Michelson, Morley e Einstein tinham mostrado que não havia éter. Portanto, se a luz não precisava de um meio no qual viajar, o que os cientistas queriam dizer quando falavam em velocidade da luz? A velocidade da luz era 300.000 km/s, mas em relação ao quê?

Einstein pensou na questão intermitentemente nos anos seguintes. Por fim chegou a uma solução para o problema, mas uma solução que dependia muito da intuição. A primeira vista, sua solução parecia absurda, e no entanto depois ficaria provado que ele estava certíssimo. De acordo com Einstein, a luz se desloca a uma velocidade constante de 300.000 km/s *em relação ao observador*. Em outras palavras, não importa quais as circunstâncias ou como a luz está sendo emitida, cada um de nós pessoalmente mede a mesma velocidade da luz, que é de 300.000 km/s, ou 300.000.000 m/s (mais precisamente 299.792.458 m/s). Isso parece absurdo porque contraria a nossa experiência diária das velocidades dos objetos comuns.

Imagine um garoto com uma zarabatana que sempre lança ervilhas com a velocidade de 40 m/s. Você está encostado num muro, num ponto da rua distante do garoto. Ele dispara a zarabatana em sua direção de modo que a

zar a um profundo entendi-

1896, quando tinha apenas 16
ria se ele pudesse viajar com
elho diante dele. Particular-
to reflexo. A teoria vitoriana
ra que permeava todo o uni-
lo éter, assim isso implicava
300.000 km/s) em relação ao
su espelho e seu rosto, tam-
luz. Portanto, a luz deveria
o espelho em sua mão, mas
> menos alcançar o espelho,
E, se a luz não podia alcançar
, consequentemente, Einstein

e desafiava completamente o
> o qual uma pessoa que se
seguiria determinar se estava
nte ou para trás — ou até se
tal de Einstein implicava que
localidade da luz porque o seu

ncia imaginária baseado num
doxal, porque contradizia o
ncia mental de Einstein pode
atrés do navio: o marinheiro
velocidade da luz porque seu
declarado com firmeza que o
o estava em movimento.

idade de Galileu estava erra-
uma falha fundamental. No
tara porque era baseada num
xo, concluiu que a luz não

ervilha deixa o cano com a velocidade de 40 m/s, cruza o espaço intermediário a 40 m/s e, quando acerta, na sua testa, certamente você sente como se ela estivesse se movendo a 40 m/s. Se o garoto montar na bicicleta e correr em sua direção a 10 m/s e disparar a zarabatana de novo, a ervilha ainda deixará o cano a 40 m/s, mas atravessará a distância a 50 m/s e o atingirá à mesma velocidade. A velocidade extra se deve ao fato de a ervilha ser lançada da bicicleta em movimento. E, se você correr na direção do garoto a 4 m/s a situação ficará ainda pior, porque a ervilha o atingirá agora movendo-se a 54 m/s. Em resumo, você (o observador) perceberá uma velocidade diferente das ervilhas dependendo de uma variedade de fatores.

Einstein acreditava que a luz se comportava de um modo diferente. Quando o garoto não está andando em sua bicicleta, então a luz do farolete o atinge com a velocidade de 299.792.458 m/s. Quando ele pedala a bicicleta em sua direção a 10 m/s a luz do farolete da bicicleta continua a atingi-lo com a velocidade de 299.792.458 m/s. E, mesmo se você andar em direção à bicicleta enquanto esta se move em sua direção, a luz ainda continuará a atingi-lo com a velocidade de 299.792.458 m/s. A luz, insistia Einstein, se desloca com uma velocidade constante em relação ao observador. Quem quer que esteja medindo a velocidade da luz, sempre encontrará o mesmo resultado, em qualquer situação. Experiências demonstrariam mais tarde que Einstein estava correto. A distinção entre o comportamento da luz e de outras coisas, tais como ervilhas, está exemplificada abaixo

	Sua visão da velocidade das ervilhas	Sua visão da velocidade da luz
Ninguém se move	40 m/s	299.792.458 m/s
Menino pedala em sua direção a 10 m/s	50 m/s	299.792.458 m/s
...e você caminha em direção ao garoto a 4 m/s	54 m/s	299.792.458 m/s

Einstein estava conveniente para o observador p sua experiência imaginária mento mental de acordo co observador em sua experiê de da luz e, não obstante, a velocidade da luz, porque a luz deixaria Einstein com a mesma velocidade, o que Exatamente a mesma coisa: espelho do banheiro — a l seria refletida de volta con Em outras palavras, ao pr relação ao observador, ent movendo com a velocidade é exatamente o que o prin que você tenha a mesma ex

A constância da veloci conclusão notável e contin ainda era apenas um adolesc da juventude que explorou público e abalaria o mund quanto trabalhava em partic

De modo decisivo, ao lo sua energia natural, sua cria ritária de seu colégio. Ele di aprendizado é a minha form sores, incluindo o eminent classificá-lo como “um cacl Weber, lhe disse: “Você é un Mas tem um grande defeito: Einstein se devia, em parte, em física, o que era o motivo Weber, em vez de Herr Profe

Einstein estava convencido de que a velocidade da luz deveria ser constante para o observador porque parecia o único meio de fazer sentido para sua experiência imaginária com o espelho. É possível reexaminar o experimento mental de acordo com a nova regra para a velocidade da luz. Se era o observador em sua experiência imaginária, Einstein viajava com a velocidade da luz e, não obstante, continuaria a ver a luz deixando o seu rosto com a velocidade da luz, porque ela se desloca em relação ao observador. E assim a luz deixaria Einstein com a velocidade da luz e seria refletida de volta com a mesma velocidade, o que significa que ele seria capaz de ver o seu reflexo. Exatamente a mesma coisa aconteceria se você estivesse imóvel diante do espelho do banheiro — a luz deixaria seu rosto com a velocidade da luz e seria refletida de volta com a velocidade da luz e você veria o seu reflexo. Em outras palavras, ao presumir que a velocidade da luz é constante em relação ao observador, então Einstein não seria capaz de dizer se estava se movendo com a velocidade da luz ou se estava imóvel no seu banheiro. Isso é exatamente o que o princípio da relatividade de Galileu exigia, ou seja, que você tenha a mesma experiência parado ou em movimento.

A constância da velocidade da luz em relação ao observador foi uma conclusão notável e continuou a dominar os pensamentos de Einstein. Ele ainda era apenas um adolescente, e assim, foi com a ambição e a ingenuidade da juventude que explorou as implicações de suas idéias. Por fim, ele iria a público e abalará o mundo com suas idéias revolucionárias, mas por enquanto tanto trabalhava em particular e continuava com sua formação.

De modo decisivo, ao longo desse período de estudos, Einstein manteve sua energia natural, sua criatividade e curiosidade, apesar da natureza autoritária de seu colégio. Ele disse uma vez: "A única coisa que interfere no meu aprendizado é a minha formação". Ele dava pouca atenção aos seus professores, incluindo o eminente Hermann Minikowski, que deu o troco ao classificá-lo como "um cachorro preguiçoso". Outro professor, Heinrich Weber, lhe disse: "Você é um garoto inteligente, Einstein, muito inteligente. Mas tem um grande defeito: não deixa que lhe ensinem nada". A atitude de Einstein se devia, em parte, à recusa de Weber de ensinar as últimas idéias em física, o que era o motivo também de Einstein se dirigir a ele como Herr Weber, em vez de Herr Professor Weber.

m/s, cruza o espaço interme-
to montar na bicicleta e correr
ana de novo, a ervilha ainda
stância a 50 m/s e o atingirá à
ao fato de a ervilha ser lançada
na direção do garoto a 4 m/s a
atingirá agora movendo-se a
e terá uma velocidade diferen-
de fatores.
de um modo diferente. Quan-
eta, então a luz do farolote o
Quando ele pedala a bicicleta
a bicicleta continua a atingi-lo
mo se você andar em direção
ção, a luz ainda continuará a
n/s. A luz, insistia Einstein, se
relação ao observador. Quem
, sempre encontrará o mesmo
demonstrariam mais tarde que
comportamento da luz e de ou-
cada abaixo

Sua visão da
velocidade da luz

299.792.458 m/s

299.792.458 m/s

299.792.458 m/s

Como resultado desse choque de personalidades, Weber não escreveu a carta de recomendação que Einstein precisava para seguir uma carreira acadêmica. E, como consequência disso, passou os sete anos seguintes à sua graduação trabalhando como funcionário no escritório de patentes em Berna, na Suíça. Mas isso acabou não sendo um grande prejuízo. No lugar de ser tolhido pelas teorias aceitas, ensinadas nas grandes universidades, Einstein agora podia se sentar em seu escritório e pensar nas implicações de suas experiências mentais da adolescência — exatamente o tipo de reflexões especulativas que Herr Professor Weber teria censurado. De início, o prosaico trabalho de escritório de Einstein, como “especialista técnico de terceira classe em período de experiência”, permitia que ele cumprisse com todas as suas responsabilidades no exame de patentes em apenas algumas horas de cada dia, deixando bastante tempo livre para conduzir suas pesquisas pessoais. Se tivesse se tornado um acadêmico em uma universidade, ele teria desperdiçado dia após dia lidando com política institucional, tarefas administrativas intermináveis e pesadas responsabilidades como professor. Em carta a um amigo, ele descreveu seu escritório como “aquele retiro secular onde desenvolvi minhas idéias mais belas”.

Esses anos como funcionário de patentes se mostrariam um dos períodos mais profícuos de sua vida intelectual. Ao mesmo tempo, foi uma época bastante emotiva para o gênio em maturação. Em 1902 Einstein sofreu o choque mais profundo de toda a sua vida, quando seu pai contraiu uma doença fatal. Em seu leito de morte, Hermann Einstein deu a Albert sua permissão para que se casasse com Mileva Marié, sem saber que o casal já tinha uma filha, Lieserl. De fato, os historiadores também desconheciam a filha de Albert e Mileva até terem acesso à correspondência pessoal de Einstein no final da década de 1980. Descobriu-se que Mileva tinha retornado à sua nativa Sérvia para dar à luz, e assim que soube do nascimento de sua filha Einstein escreveu para Mileva: “Ela tem saúde e já chora adequadamente? Que tipo de olhinhos ela tem? Com qual de nós se parece mais? Quem a está amamentando? Ela tem fome? Já tem cabelos? Eu a amo tanto e nem a conheço ainda!... Ela certamente já pode chorar,

mas só vai aprender a rir. Albert nunca ouviria sua filha correr o risco da vergonha. Lieserl foi oferecida para

Albert e Mileva se casar. Ele nasceu no ano seguinte. As dificuldades da paternidade com a filha de Einstein finalmente convertem o verso. Sua pesquisa teórica e filosófica publica trabalhos, ele analisa o movimento browniano e, a partir da teoria de que a matéria e a luz são um trabalho, ele mostrou que a fotoeletricidade podia ser tratada com a mecânica quântica. Não é de surpresa que ele ganhou um prêmio Nobel.

O terceiro trabalho, sobre a relatividade, as idéias de Einstein da constância em relação aos movimentos para a física e o universo. Não era tanto tão importante, mas as coisas eram atordoantes até me vem, acabara de completar o primeiro período de ensino como sua *teoria da relatividade* especial, quando a teoria especial, fui assolado por isso costumava passar semanas naquela época, ainda não o primeiro choque com tais

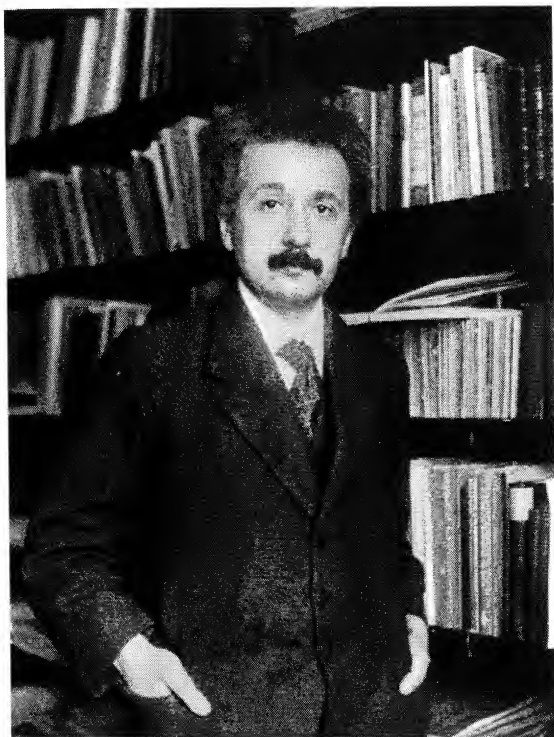


Figura 21 Albert Einstein fotografado em 1905, ano em que publicou a sua teoria da relatividade especial e firmou sua reputação.

Uma das conseqüências mais assombrosas da teoria da relatividade especial de Einstein é que nossa noção familiar de tempo é fundamentalmente errada. Os cientistas e os não-cientistas sempre conceberam o tempo como o avanço de algum tipo de relógio universal que tiquetaqueava sem parar, uma batida de coração cósmica, uma referência diante da qual todos os outros relógios poderiam ser acertados. O tempo seria o mesmo para todos, porque viveríamos no ritmo do mesmo relógio universal: o mesmo pêndulo oscilaria na mesma proporção hoje e amanhã, em Londres ou em Sydney, para você ou para mim. Presumia-se que o tempo era absoluto, regular e universal. Não, disse Einstein: o tempo é flexível, elástico e pessoal, assim o seu tempo pode ser diferente do meu tempo. Em particular, um relógio que se move em relação a você bate mais lentamente do que um relógio colocado

ao seu lado. Assim, se estive na plataforma da estação, o alta velocidade, eu percebo do que o meu.

Isso parece impossível, que se segue nos próximos tempo é pessoal para o ob desloca o relógio observado são bem simples, e, se você mente por que a relatividade mundo. Contudo, se pular preocupe, porque os aspectos cálculo estiver completo.

Para entender o impacto certo de tempo, vamos imaginar comum. Todos os relógios regular que possa ser usado para ante no relógio do vovô ou relógio de Alice, esse mecanismo dois espelhos paralelos, separados por uma distância d , mostrado na figura 22(a). O a velocidade da luz é constante (c), a velocidade da luz é de 300.000 m/s), assim, se uma batida for enviada de um espelho para o outro, o tempo entre batidas é

$$\text{Tempo}_{\text{Alice}} = \frac{d}{c}$$

Alice leva seu relógio para uma velocidade constante v ao longo de cada batida do relógio p

ao seu lado. Assim, se estiver em um trem em movimento e eu estiver em pé na plataforma da estação, olhando para o seu relógio quando você passa em alta velocidade, eu perceberia o seu relógio funcionando mais lentamente do que o meu.

Isso parece impossível, mas para Einstein era logicamente inevitável. O que se segue nos próximos parágrafos é uma breve explicação de por que o tempo é pessoal para o observador e depende da velocidade com que se desloca o relógio observado. Embora haja alguma matemática, as fórmulas são bem simples, e, se você puder seguir a lógica, então vai entender exatamente por que a relatividade especial nos forçou a mudar a nossa visão de mundo. Contudo, se pular a matemática ou ficar emperrado nela, não se preocupe, porque os aspectos mais importantes serão resumidos quando o cálculo estiver completo.

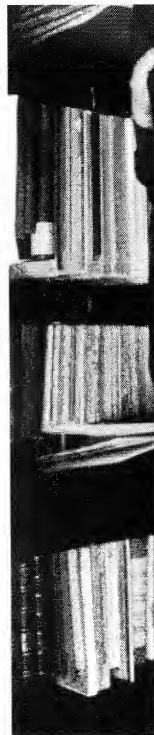
Para entender o impacto da teoria da relatividade especial sobre o conceito de tempo, vamos imaginar uma inventora, Alice, e seu relógio fora do comum. Todos os relógios precisam de um mecanismo com uma batida regular que possa ser usado para contar o tempo, assim como o pêndulo oscilante no relógio do vovô ou o gotejar constante num relógio de água. No relógio de Alice, esse mecanismo é uma pulsação de luz que é refletida entre dois espelhos paralelos, separados por uma distância de 1,8 metro, como mostrado na figura 22(a). Os reflexos são ideais para medir o tempo porque a velocidade da luz é constante, e assim o relógio será altamente preciso. A velocidade da luz é de 300.000.000 m/s (que pode ser escrito como 3×10^8 m/s), assim, se uma batida for definida como o tempo para um pulso de luz viajar de um espelho para o outro e de volta, então Alice vê que o tempo entre batidas é

$$\text{Tempo}_{\text{Alice}} = \frac{\text{distância}}{\text{velocidade}} = \frac{3,6 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 1,2 \times 10^{-8}$$

Alice leva seu relógio para dentro de um vagão de trem que se move com uma velocidade constante ao longo de um trilho reto. Ela vê que a duração de cada batida do relógio permanece a mesma — lembre-se de que tudo

em que publicou a sua teoria da

a teoria da relatividade espe-
tempo é fundamentalmente
conceberam o tempo como o
que nunca se para, uma
ante da qual todos os outros
o mesmo para todos, porque
o mesmo pêndulo oscila-
ondres ou em Sydney, para
a absoluto, regular e univer-
ástico e pessoal, assim o seu
articular, um relógio que se
lo que um relógio colocado



deve permanecer igual porque o princípio da relatividade de Galileu diz que deveria ser impossível para ela dizer se está parada ou em movimento pela simples observação dos objetos que viajam com ela.

Enquanto isso, o amigo de Alice, Bob, está de pé na plataforma da estação enquanto o trem passa por ela a 80% da velocidade da luz, que é de $2,4 \times 10^8$ m/s (esse é um trem expresso no sentido mais extremo da palavra). Bob pode ver Alice e seu relógio através de uma grande janela no vagão, e do seu ponto de vista o raio de luz descreve uma trajetória em ângulo, como mostrado na figura 22(b). Ele vê a luz fazendo seu movimento normal, para cima e para baixo, mas para ele a luz também se move lateralmente, junto com o trem.

Em outras palavras, enquanto deixava o espelho inferior e chegava ao espelho superior, o relógio moveu-se para diante, de modo que a luz teve que seguir uma trajetória diagonal. De fato, da perspectiva de Bob, o trem tinha se movido para a frente 2,4 metros na ocasião em que o raio chegou ao espelho superior, o que leva a um comprimento diagonal de três metros, assim o raio de luz teve que percorrer seis metros (para cima e para baixo) entre as batidas. E como, de acordo com Einstein, a velocidade da luz é constante para qualquer observador, para Bob, o tempo entre as batidas deve ser mais longo, porque o raio de luz viaja com a mesma velocidade mas tem que percorrer uma distância maior. A percepção do tempo de Bob entre os sinais do relógio é fácil de calcular:

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = \frac{\text{distância}}{\text{velocidade}} = \frac{6,0 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2,0 \times 10^{-8} \text{ s}$$

É nesse ponto que a realidade do tempo começa a parecer estranhíssima e um tanto perturbadora. Alice e Bob se encontram para comparar suas anotações. Bob diz que viu o relógio-espelho de Alice pulsando uma vez a cada 2×10^{-8} s, enquanto Alice afirma que seu relógio estava pulsando uma vez a cada $1,2 \times 10^{-8}$ s. Em relação a Alice, o seu relógio está funcionando perfeitamente. Alice e Bob podiam estar olhando para o mesmo relógio, mas eles percebiam a contagem do tempo acontecendo a taxas diferentes.

(a)

(b)

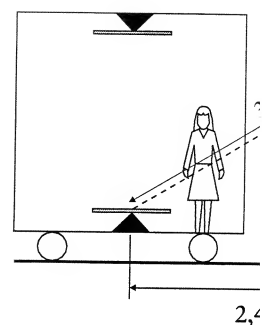


Figura 22 O cenário segundo a relatividade especial de Einstein. (a) O relógio-espelho, que “bate” o tempo entre dois espelhos. O trem está se movendo a 80% da velocidade da luz em relação a Alice, assim ela o vê em movimento.

O diagrama (b) mostra a trajetória da luz do ponto de vista de Bob. O vagão está se movendo a 80% da velocidade da luz, assim a trajetória da luz é diagonal. Para Bob, a luz viaja mais longe. Assim, ele pensa que o tempo de Alice é mais longo.

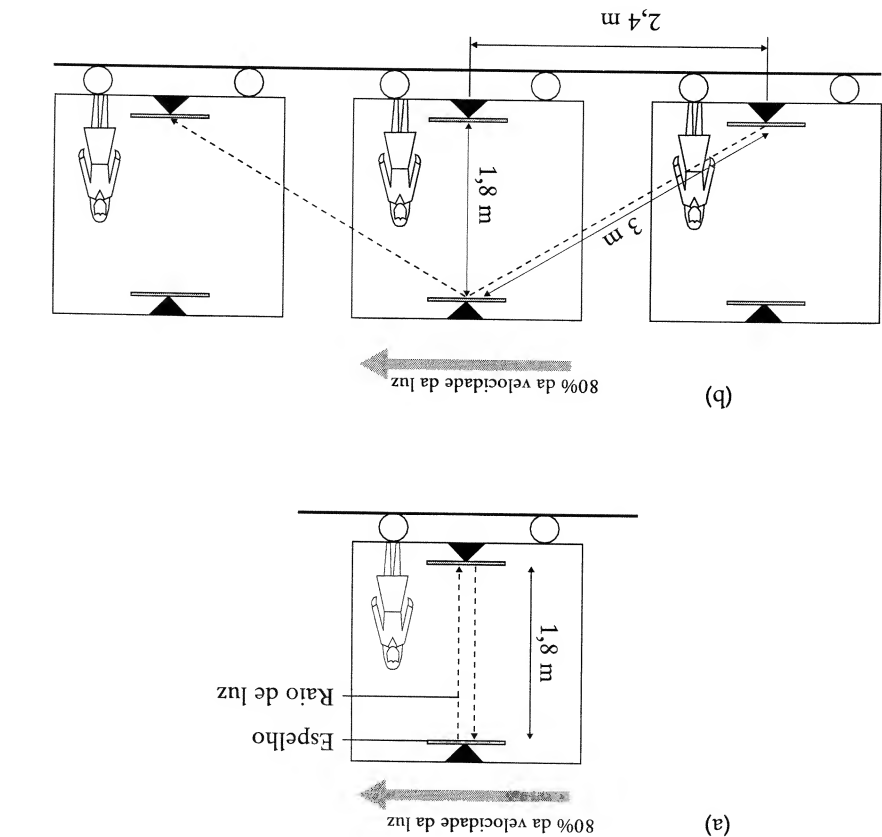


Figura 22 O cenário seguinte demonstra uma das principais consequências da teoria da relatividade especial de Einstein. Alice encontra-se dentro de seu vagão de trem com seu relógio-espelho, que “bate” com regularidade à medida que uma pulsagem de luz é refletida entre dois espelhos. O diagrama (a) mostra a situação da perspectiva de Alice. O vagão está se movendo a 80% da velocidade da luz, mas o relógio não se move em relação a Alice, assim ela o vê funcionar de modo normal, à mesma taxa de sempre. O diagrama (b) mostra a mesma situação (Alice e seu relógio) da perspectiva de Bob. O vagão está se movendo a 80% da velocidade da luz, assim Bob vê o pulso de luz seguir uma trajetória diagonal. E, como a velocidade da luz é constante para todos os observadores, Bob percebe que leva mais tempo para o pulso de luz percorrer a trajetória diagonal do que na percepção de Alice.

relatividade de Galileu diz que arada ou em movimento pela m ela.

à de pé na plataforma da esta- velocidade da luz, que é de 2,4 do mais extremo da palavra). a grande janela no vagão, e do a trajetória em ângulo, como o seu movimento normal, para n se move lateralmente, junto

espelho inferior e chegava ao diante, de modo que a luz teve da perspectiva de Bob, o trem casião em que o raio chegou ao ento diagonal de três metros,etros (para cima e para baixo) Einstein, a velocidade da luz é Bob, o tempo entre as batidas a com a mesma velocidade mas cepção do tempo de Bob entre

$$\frac{m}{s} = 2,0 \times 10^{-8} s$$

começa a parecer estranhíssima ntram para comparar suas ano- Alice pulsando uma vez a cada ígio estava pulsando uma vez a ígio está funcionando perfei- para o mesmo relógio, mas eles o a taxas diferentes.

Einstein criou uma fórmula que descreve como o tempo muda para Bob em relação a Alice sob cada circunstância:

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = \text{Tempo}_{\text{Alice}} \times \frac{1}{\sqrt{1 - v_A^2/c^2}}$$

Esta diz que os intervalos de tempo observados por Bob são diferentes dos observados por Alice, dependendo da velocidade de Alice (v_A) relativa a Bob e a velocidade da luz (c). Se inserirmos os números apropriados no caso descrito acima, então poderemos ver como a fórmula funciona.

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = 1,2 \times 10^{-8} \text{ s} \times \frac{1}{\sqrt{1 - (0,8c)^2/c^2}}$$

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = 1,2 \times 10^{-8} \text{ s} \times \frac{1}{\sqrt{1 - 0,64}}$$

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = 2,0 \times 10^{-8} \text{ s}$$

Einstein certa vez brincou dizendo: “Coloque sua mão em uma chapa quente durante um minuto e vai parecer uma hora. Sente ao lado de uma linda moça durante uma hora e vai parecer um minuto. Isso é relatividade”. Mas a teoria da relatividade especial não era brincadeira. As fórmulas matemáticas de Einstein descreviam de modo preciso como qualquer observador perceberia genuinamente o atraso na passagem do tempo olhando para um relógio em movimento, um fenômeno conhecido como *dilatação do tempo*. Isso parece tão absurdo que levanta imediatamente quatro questões:

1. *Por que nunca notamos esse efeito?*

A magnitude da dilatação do tempo depende da velocidade do relógio ou objeto em questão comparada com a velocidade da luz. No exemplo, a dilatação do tempo é significativa porque o vagão de Alice se desloca a 80% da velocidade da luz, ou seja, 240.000.000 m/s. Contudo, se o vagão estivesse viajando a uma velocidade mais razoável de 100 m/s (360 km/h), então a

percepção de Bob do tempo seria diferente. Colocando os números na fórmula, vemos que a diferença na percepção é de apenas alguns picossegundos. Em outras palavras, os efeitos da dilatação do tempo são muito pequenos em velocidades cotidianas.

2. *Essa diferença é real?*

Sim, é bem real. Existem tecnologias, que precisam funcionar adequadamente, que dependem de satélites como os sistemas de navegação global. Eles levam em consideração os efeitos da dilatação do tempo porque os satélites são cronômetros de alta precisão.

3. *A teoria da relatividade especial depende de raios de luz?*

A teoria se aplica a todos os fenômenos físicos que acontecem porque a luz se propaga em nível atômico. Portanto, os relógios no vagão se retardam devido às interações atômicas induzidas pelo retardamento atômico. Isso acontece mais lentamente, Bob a velocidade da luz piscaria e pensaria mais lentamente. Tudo seria afetado pela dilatação temporal.

4. *Por que Alice não pode fazer movimentos para provar a dilatação do tempo?*

Todos os efeitos peculiares da relatividade especial do trem em movimento. No entanto, se o trem fosse perfeitamente normal, por exemplo, os relógios no vagão estão se movendo em relação ao solo.

como o tempo muda para Bob

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v_A^2/c^2}}$$

rvados por Bob são diferentes
ocidade de Alice (v_A) relativa a
números apropriados no caso
fórmula funciona.

$$\frac{1}{1 - (0,8c)^2/c^2}$$

$$\frac{1}{1 - 0,64}$$

loque sua mão em uma chapa
a hora. Sente ao lado de uma
m minuto. Isso é relatividade”.
brincadeira. As fórmulas mate-
rismo como qualquer observador
m do tempo olhando para um
cido como *dilatação do tempo*.
mente quatro questões:

da velocidade do relógio ou
da luz. No exemplo, a dila-
de Alice se desloca a 80% da
Contudo, se o vagão estivesse
100 m/s (360 km/h), então a

percepção de Bob do relógio de Alice seria quase igual à percepção dela.
Colocando os números correspondentes na equação de Einstein mostraria
que a diferença na percepção do tempo pelo casal seria de uma parte em 1
trilhão. Em outras palavras, é impossível para os seres humanos detectarem
os efeitos da dilatação do tempo no dia-a-dia.

2. Essa diferença é real?

Sim, é bem real. Existem muitas peças de equipamentos sofisticados, de alta
tecnologia, que precisam levar em conta o efeito da dilatação do tempo para
funcionarem adequadamente. O Sistema de Posicionamento Global (GPS),
que depende de satélites para determinar localizações por meio de aparelhos
como os sistemas de navegação dos carros, só funciona com precisão porque
leva em consideração os efeitos da relatividade especial. Tais efeitos são sig-
nificativos porque os satélites GPS viajam a velocidades muito altas e usam
cronômetros de alta precisão.

3. A teoria da relatividade especial de Einstein se aplica apenas a relógios que dependem de raios de luz?

A teoria se aplica a todos os relógios e, de fato, a todos os fenômenos. Isso
acontece porque a luz realmente determina as interações que acontecem no
em nível atômico. Portanto, todas as interações atômicas que acontecem no
vagão se retardam do ponto de vista do Bob. Ele não pode perceber essas
interações atômicas individuais, mas pode ver o efeito combinado desse
retardamento atômico. Além de ver o relógio-espelho de Alice piscando
mais lentamente, Bob a veria acenar mais lentamente enquanto passava, ela
piscaria e pensaria mais lentamente, e até suas batidas de coração se retar-
dariam. Tudo seria afetado de modo semelhante pelo mesmo grau de dila-
tação temporal.

4. Por que Alice não pode usar o atraso de seu relógio e a lentidão de seus movimentos para provar que está se movendo?

Todos os efeitos peculiares descritos acima são observados por Bob de fora
do trem em movimento. No que concerne a Alice, tudo dentro do trem está
perfeitamente normal, porque nem o seu relógio nem os outros objetos no
vagão estão se movendo em relação a ela. Movimento relativo zero significa

dilatação temporal zero. Não devemos nos surpreender que não haja dilatação de tempo, porque, se Alice notasse qualquer mudança ao seu redor, como resultado do movimento do vagão, isso contrariaria o princípio da relatividade de Galileu. Entretanto, se Alice olhasse para Bob enquanto passava zunindo por ele, a ela pareceria que Bob e seu ambiente é que estavam sofrendo uma dilatação temporal, porque ele estaria se movendo em relação a ela.

A teoria da relatividade especial atinge outros aspectos da física de modo igualmente atordoante. Einstein mostrou que, à medida que Alice se aproxima, Bob percebe que ela se contrai na direção de seus movimentos. Em outras palavras, se Alice tem dois metros de altura e 25 centímetros da frente para trás, e está olhando para a parte dianteira do trem enquanto este se aproxima de Bob, então ele a veria com dois metros de altura mas com apenas 15 centímetros de espessura. Ela pareceria mais magra. Isso não é nada tão trivial quanto uma ilusão baseada na perspectiva, mas é de fato uma realidade na visão de Bob da distância e do espaço. É uma consequência do mesmo tipo de raciocínio que faz Bob observar o relógio de Alice funcionando mais lentamente.

Assim, além de investir contra as noções tradicionais de tempo, a relatividade especial forçava os físicos a reconsiderarem suas noções arraigadas de espaço. Em lugar de tempo e espaço serem constantes e universais, eram flexíveis e pessoais. Não surpreende que o próprio Einstein, à medida que desenvolvia sua teoria, às vezes achasse difícil confiar em sua própria lógica e conclusões. “Esse argumento é sedutor e divertido”, disse ele, “mas, pelo que sei, o Senhor pode estar rindo de mim e me fazendo andar em círculos”.

Apesar disso, Einstein superou suas dúvidas e continuou a seguir a lógica de suas equações. Depois que sua pesquisa foi publicada, os estudiosos viram-se forçados a reconhecer que um solitário funcionário de patentes tinha feito uma das descobertas mais importantes da história da física. Max Planck, o pai da teoria quântica, disse a respeito de Einstein que “se [a relatividade] se mostrar correta, e eu espero que seja, ele será considerado o Copérnico do século XX”.

As previsões de Einstein da dilatação do tempo e da contração do comprimento foram todas confirmadas por experiências no devido tempo. Só a

sua teoria da relatividade dos físicos mais brilhantes da física vitoriana. Mas a

Logo depois de publicar num programa de devido contexto, Einstein fez uma “brincadeira” recompensas, contudo, revelaria como o único cosmólogo as ferramentas fundamentais imagináv

A batalha da

As idéias de Einstein e a comunidade científica a bora ele tivesse publicado em 1908 que recebeu em Berna. Entre 1905 e 1910 patentes em Berna, onde ele era “classe” e ganhou tempo para desenvolver sua teoria da relatividade.

A teoria da relatividade apenas a situações específicas de velocidade constante. Ervando o trem de Alice e o trem de Bob, mas não com um trem em movimento. Consequentemente, Einstein pôde lidar com situações de extensão da relatividade geral, porque se a

Quando Einstein fez a relatividade geral em 1915

sua teoria da relatividade especial teria sido suficiente para fazer dele um dos físicos mais brilhantes do século XX, provocando uma revisão radical da física vitoriana. Mas a estatura de Einstein o levaria a alturas ainda maiores. Logo depois de publicar seus trabalhos, em 1905, ele começou a trabalhar num programa de pesquisas ainda mais ambicioso. Para colocá-lo no devido contexto, Einstein certa vez chamou sua teoria da relatividade especial uma "brincadeira de criança" comparada com o que viria depois. As recompensas, contudo, valeriam o esforço. Sua próxima grande descoberta revelaria como o universo se comporta em grande escala e daria aos cosmólogos as ferramentas de que precisavam para abordar as questões mais fundamentais imagináveis.

A batalha da gravidade: Newton versus Einstein

As idéias de Einstein eram tão iconoclastas que levou tempo para que a comunidade científica acolhesse esse funcionário público em seu meio. Embora ele tivesse publicado sua teoria da relatividade especial em 1905, foi só em 1908 que recebeu seu primeiro posto acadêmico na Universidade de Berna. Entre 1905 e 1908, Einstein continuou a trabalhar no escritório de patentes em Berna, onde foi promovido a "especialista técnico de segunda classe" e ganhou tempo para prosseguir com seu esforço de entender o poder de sua teoria da relatividade.

A teoria da relatividade especial é rotulada de *especial* porque se aplica apenas a situações especiais, aquelas nas quais os objetos se movem a uma velocidade constante. Em outras palavras, ela poderia lidar com Bob observando o trem de Alice em deslocamento a uma velocidade fixa em um trilho reto, mas não com um trem que estivesse acelerado ou perdendo velocidade. Consequentemente, Einstein tentou reformular sua teoria de modo que ela pudesse lidar com situações envolvendo aceleração e deceleração. Essa grande extensão da relatividade especial logo se tornaria conhecida como *relatividade geral*, porque se aplicaria a situações mais generalizadas. Quando Einstein fez o seu primeiro grande avanço para a criação da relatividade geral em 1907, ele o classificou como "o dia mais feliz da minha

prender que não haja dilatação mudança ao seu redor, como a o princípio da relatividade ob enquanto passava zunindo e é que estavam sofrendo uma ndo em relação a ela.

os aspectos da física de modo , à medida que Alice se aproximava de seus movimentos. Em altura e 25 centímetros da frenteira do trem enquanto este se dois metros de altura mas com receria mais magra. Isso não é perspectiva, mas é de fato uma espaço. É uma consequência do ar o relógio de Alice funcionan-

tradicional de tempo, a relatividade suas noções arraigadas n constantes e universais, eram próprio Einstein, à medida que l confiar em sua própria lógica invertido", disse ele, "mas, pelo me fazendo andar em círculos". las e continuou a seguir a lógica foi publicada, os estudiosos vi-o funcionário de patentes tinha a história da física. Max Planck, Einstein que "se [a relatividade] será considerado o Copérnico

tempo e da contração do comprimento no devido tempo. Só a

vida". O que se seguiu, contudo, foram oito anos de tormento. Ele contou a um amigo como a sua obsessão com a relatividade geral o estava forçando a negligenciar todos os outros aspectos de sua vida: "Eu não tenho tempo para escrever porque estou ocupado com coisas verdadeiramente grandes. Dia e noite eu torturo meu cérebro num esforço para penetrar mais profundamente nas coisas que descobri nos dois últimos anos e que representam um avanço sem precedentes nos problemas fundamentais da física".

Ao falar em "coisas verdadeiramente grandes" e "problemas fundamentais", Einstein se referia ao fato de que a teoria da relatividade geral parecia estar conduzindo-o a uma teoria inteiramente nova da gravidade. Se Einstein estava certo, então os físicos seriam forçados a questionar o trabalho de Isaac Newton, um dos ícones da física.

Newton nasceu em circunstâncias trágicas no dia de Natal de 1642, seu pai tendo morrido três meses antes. Enquanto Isaac ainda era criança, sua mãe casou de novo com um reitor de 63 anos de idade, Barnabas Smith, que se recusou a aceitar Isaac em sua casa. Coube aos avós de Isaac a tarefa de criá-lo, e a cada ano que passava ele desenvolvia um ódio crescente em relação à mãe e ao padrasto, que o tinham abandonado. De fato, quando estudante universitário, ele fez uma lista dos pecados da sua infância, que incluía a admissão de "ameaçar meu pai e minha mãe Smith de queimá-los com sua casa".

Não surpreende que Newton se tornasse um homem amargurado, isolado e às vezes cruel. Quando foi nomeado diretor da Casa da Moeda, em 1696, ele implementou um duro regime de caça aos falsificadores, cuidando para que os condenados fossem enforcados, arrastados e esquartejados. A falsificação da moeda levava a Grã-Bretanha à beira do colapso econômico, e Newton achava que suas punições eram necessárias. Além de empregar a brutalidade, Newton usou seu cérebro para salvar a economia nacional. Uma de suas inovações mais importantes na Casa da Moeda foi a introdução de bordas serrilhadas nas moedas para combater a prática do desbaste, pela qual os falsificadores cortavam as beiradas das moedas e usavam as lascas para fazer novas moedas.

Em reconhecimento pela contribuição de Newton, a moeda britânica de duas libras, emitida em 1997, tinha a frase DE PÉ NOS OMBROS DE GIGANTES em torno de sua borda serrilhada. Essas palavras foram extraídas de uma

carta que Newton enviou escreveu: "Se pude enxer ombros de gigantes". Isso são de que as próprias id seus ilustres predecessores era uma referência velada vado. Em outras palavras, um gigante fisicamente, n

Contudo, apesar de se buição sem paralelo para : mentos para uma nova e durou pouco mais de 18 r como o *annus mirabilis* (mente o título de um poe mais sensacionais que occ dres depois do Grande In quesa. Os cientistas, todav os verdadeiros milagres d ços em cálculo, óptica e,

Em essência, a lei da universo atrai outro obje atração entre dois objeto

A força (F) entre dois ob quanto maior a massa, m porcional ao quadrado da a força fica menor à n gravitacional (G) é sempr gravidade comparada cor

O poder dessa fórmu Galileu tinham tentado e

carta que Newton enviou para seu colega cientista Robert Hooke, na qual escreveu: "Se pude enxergar mais longe foi porque fiquei de pé sobre os ombros de gigantes". Isso parece uma declaração de modéstia, uma admisão de que as próprias idéias de Newton tinham sido erguidas sobre as de seus ilustres predecessores, como Galileu e Pitágoras. Mas na verdade a frase era uma referência velada e ofensiva à corcunda de Hooke e seu andar curvado. Em outras palavras, Newton estava sugerindo que Hooke não era nem um gigante fisicamente, nem, por implicação, um gigante intelectual.

Contudo, apesar de seus defeitos como pessoa, Newton fez uma contribuição sem paralelo para a ciência do século XVII. Ele estabeleceu os fundamentos para uma nova era científica com uma ofensiva de pesquisas que durou pouco mais de 18 meses, culminando em 1666, que hoje é conhecido como o *annus mirabilis* (ano milagroso) de Newton. O termo era originalmente o título de um poema de John Dryden sobre outros acontecimentos mais sensacionais que ocorreram em 1666, ou seja, a sobrevivência de Londres depois do Grande Incêndio e a vitória da frota inglesa sobre a dinamarquesa. Os cientistas, todavia, consideraram que as descobertas de Newton foram os verdadeiros milagres de 1666. Seu *annus mirabilis* incluiu grandes avanços em cálculo, óptica e, o que é mais conhecido, na gravidade.

Em essência, a lei da gravidade de Newton afirma que cada objeto no universo atrai outro objeto. Mais exatamente Newton definiu a força de atração entre dois objetos quaisquer como

$$F = \frac{G \times m_1 \times m_2}{r^2}$$

A força (F) entre dois objetos depende das massas dos objetos (m_1 e m_2) — quanto maior a massa, maior a força. A força também é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os objetos (r^2), o que significa que a força fica menor à medida que os objetos se afastam. A constante gravitacional (G) é sempre igual a $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$, e reflete a força da gravidade comparada com outras forças, como o magnetismo.

O poder dessa fórmula é que ela abrange tudo que Copérnico, Kepler e Galileu tinham tentado explicar sobre o Sistema Solar. Por exemplo, o fato

mos de tormento. Ele contou a idade geral o estava forçando a vida: "Eu não tenho tempo visas verdadeiramente grandes. rgo para penetrar mais profundamente para representar os últimos anos e que representam fundamentais da física".

ades" e "problemas fundamentais da relatividade geral parecia nova da gravidade. Se Einstein os a questionar o trabalho de Isaac ainda era criança, sua mãe idade, Barnabas Smith, que se avós de Isaac a tarefa de criá-lo, dio crescente em relação à mãe fato, quando estudante universância, que incluía a admissão de imá-los com sua casa".

um homem amargurado, isolado-litector da Casa da Moeda, em aça aos falsificadores, cuidando arrastados e esquarterados. A à beira do colapso econômico, necessárias. Além de empregar a livar a economia nacional. Uma da Moeda foi a introdução de er a prática do desbaste, pelas moedas e usavam as lascas

Newton, a moeda britânica de E PÊ NOS OMBROS DE GIGANTES avras foram extraídas de uma

de uma maçã cair em direção ao solo não significa que esta queira chegar ao centro do universo, mas simplesmente que ambas, a Terra e a maçã, têm massa, e assim são atraídas naturalmente uma para a outra pela força da gravidade. A maçã acelera em direção à Terra, e ao mesmo tempo até mesmo a Terra acelera em direção à maçã, embora o efeito sobre a Terra seja imperceptível, porque esta é muito mais maciça do que a maçã. De modo semelhante, a equação da gravidade de Newton pode ser usada para explicar como a Terra orbita o Sol, porque ambos os corpos têm massa e portanto existe uma atração mútua entre eles. Novamente, a Terra orbita o Sol e não vice-versa, porque a Terra é muito menos maciça do que o Sol. De fato, a fórmula da gravidade de Newton pode até mesmo ser usada para prever que luas e planetas vão percorrer trajetórias elípticas, o que é exatamente o que Kepler demonstrou depois de analisar as observações de Tycho Brahe.

Durante séculos depois de sua morte, a lei da gravitação de Newton reinou sobre o cosmos. Os cientistas presumiam que o problema da gravidade tinha sido resolvido e usavam a fórmula de Newton para explicar tudo, do vôo de uma flecha à trajetória de um cometa. O próprio Newton, entretanto, suspeitava de que seu entendimento do universo estava incompleto: “Eu não sei como o mundo me vê, mas para mim eu tenho sido apenas um menino brincando na praia, e me divertindo aqui e ali ao encontrar uma pedra mais polida ou uma concha mais bonita do que as outras, enquanto o grande oceano da verdade permanece desconhecido diante de mim”.

E foi Albert Einstein quem primeiro percebeu que poderia existir mais coisas na gravidade do que Newton imaginara. Depois do seu próprio *annus mirabilis* em 1905, quando Einstein publicou vários trabalhos históricos, Einstein concentrou-se em ampliar sua teoria da relatividade especial para uma teoria geral. Isso envolvia uma interpretação radicalmente diferente da gravidade baseada em uma visão diferente de como os planetas, as luas e as maçãs se atraem uns aos outros.

No cerne da nova abordagem de Einstein estava a descoberta de que a distância e o tempo são flexíveis, o que era uma consequência da sua teoria da relatividade especial. Lembrem-se de que Bob vê um relógio andando mais devagar e Alice ficando mais magra à medida que se movem em sua direção. Assim, o tempo é flexível, assim como as três dimensões do espaço

(largura, altura e profundidade) como do tempo são incluídas em uma única entidade flexível chamada espaço-tempo. O espaço-tempo flexível se revelou a causa da gravidade. Sua flexibilidade é sem dúvida a maneira razoavelmente simples de explicar a gravidade.

O espaço-tempo é formado por uma rede de tempo, o que é inimaginável. É mais fácil considerar a rede de espaço-tempo na figura 23. Felizmente, as características-chave do espaço-tempo são a sua simplicidade e a sua amplificação conveniente. A rede de espaço-tempo é como um pedaço de tecido elástico. Para mostrar que, se nada estivesse nele, ele seria plano e imperturbável. A figura 23 mostra bastante se um objeto for colocado nele, ele representa o espaço se estica e se curva elástica curvando-se sob o peso do objeto.

De fato, a analogia da bola de boliche representa o Sol, que pode ser lançada em órbita ao redor de uma bola de tênis na verdade, a bola de tênis carrega enquanto circula. Se quisermos tentar rolar uma bola de tênis fazendo-a girar ao seu redor, elas correriam em torno do furo.

Na prática, qualquer coisa que se mova em uma cama elástica logo depois de um movimento natural dos objetos. É exatamente esse tipo de efeito do espaço-tempo. De acordo com a teoria, os testemunhos de fenômenos estavam realmente vendo o

(largura, altura e profundidade). Além disso, as flexibilidades tanto do espaço como do tempo são indissociáveis, o que levou Einstein a considerar uma única entidade flexível conhecida como *espaço-tempo*. Essa progressão de estranha flexibilidade se revelou a causa subjacente à gravidade. Essa progressão fornece uma maneira razoavelmente fácil de visualizar a filosofia de Einstein para a gravidade.

O espaço-tempo é formado por quatro dimensões, três de espaço e uma de tempo, o que é imaginável para a maioria dos mortais, assim, geralmente é mais fácil considerar apenas duas dimensões de espaço, como mostrado na figura 23. Felizmente esse espaço-tempo rudimentar ilustra muitas das características-chave do autêntico espaço-tempo, de modo que é uma simplificação conveniente. A figura 23(a) mostra que o espaço (de fato, o espaço-tempo) é como um pedaço de tecido esticado, e a grade de linhas ajuda a mostrar que, se nada estiver ocupando o espaço, então seu "tecido" é plano e imperturbável. A figura 23(b) mostra como o espaço bidimensional muda bastante se um objeto for colocado sobre ele. Este segundo diagrama poderia representar o espaço sendo torcido por um Sol maciço, como uma cama elástica curvando-se sob o peso de uma bola de boliche.

De fato, a analogia da cama elástica pode ser estendida. Se uma bola de boliche representa o Sol, então uma bola de ténis representando a Terra pode ser lançada em órbita ao redor dele, como mostrado na figura 23(c). A bola de ténis na verdade cria sua própria depressão na cama elástica e a carga enquanto circula. Se quiséssemos um modelo da Lua, então poderíamos tentar rolar uma bolinha de gude na depressão causada pela bola de ténis fazendo-a girar ao seu redor enquanto a bola de ténis e sua concavidade correriam em torno do fosso causado pela bola de boliche.

Na prática, qualquer tentativa de modelar um sistema complicado em uma cama elástica logo desmorona devido à fricção do tecido que agita o movimento natural dos objetos. Não obstante, Einstein afirmava que exatamente esse tipo de efeito de cama elástica estava acontecendo no tecido do espaço-tempo. De acordo com Einstein, sempre que os físicos e astrônomos testemunhavam fenômenos envolvendo a força da atração gravitacional, eles estavam realmente vendo objetos reagindo à curvatura do espaço-tempo.

ficca que esta queira chegar ao
mbas, a Terra e a maçã, têm
ra para a outra pela força da
e ao mesmo tempo até mesmo
feito sobre a Terra seja imper-
que a maçã. De modo seme-
pode ser usada para explicar
corpos têm massa e portanto
nte, a Terra orbita o Sol e não
aíça do que o Sol. De fato, a
mo ser usada para prever que
cas, o que é exatamente o que
eranças de Tycho Brahe.

lei da gravitação de Newton
um que o problema da gravida-
le Newton para explicar tudo,
eta. O próprio Newton, entre-
o universo estava incompleto:
mim eu tenho sido apenas um
aquí e ali ao encontrar uma
do que as outras, enquanto o
ibecido diante de mim".

debeu que poderia existir mais
r. Depois do seu próprio *annus*
ou vários trabalhos históricos,
a da relatividade especial para
ação radicalmente diferente da
como os planetas, as luas e as

estava a descoberta de que a
ma consequência da sua teoria
; Bob vê um relógio andando
medida que se movem em sua
io as três dimensões do espaço

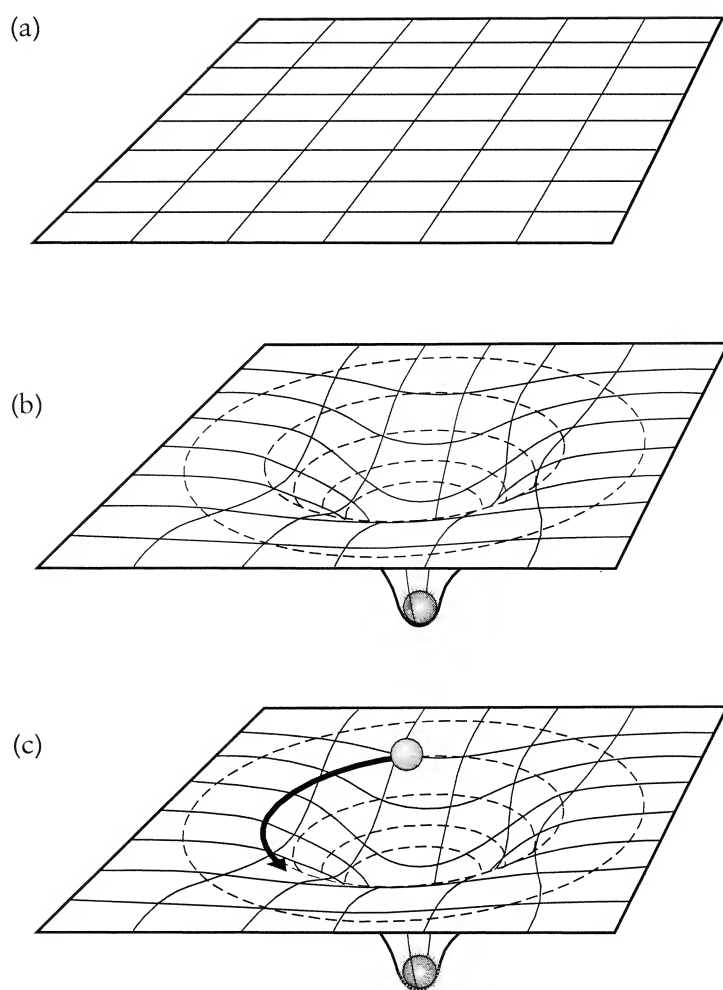


Figura 23 Estes diagramas são representações bidimensionais do espaço-tempo quadridimensional, ignorando uma dimensão de tempo e uma de espaço. O diagrama (a) mostra uma tela chata, lisa, não perturbada, representando o espaço vazio. Se um planeta passasse por este espaço, ele seguiria em uma linha reta.

O diagrama (b) mostra o espaço torcido por um objeto como o Sol. A profundidade da depressão depende da massa do Sol.

O diagrama (c) mostra um planeta orbitando a depressão causada pelo Sol. O planeta provoca sua própria pequena depressão no espaço, que é demasiado pequena para ser representada neste diagrama porque o planeta é relativamente leve.

Por exemplo, Newton diria que a força de atração gravitacional é o que causa o tendimento profundo do que cai no solo porque estava sendo atraído pela massa da Terra.

A presença de objetos no espaço-tempo é de mão dupla. A forma do espaço-tempo, e, ao mesmo tempo, esse espaço-tempo. Em outras palavras, o Sol e os planetas são causa e efeito. Como Wheeler, um dos principais físicos do século XX, disse: "A matéria diz ao espaço-tempo como se mover". Em termos mais concisos ("espaço-tempo" deveria ser a teoria de Einstein).

Essa noção de espaço-tempo curvo estava convencido de que era verdadeira, e, por critérios estéticos, o elo entre a teoria e a realidade seria verdadeiro, ou, como Einstein disse: "Se a teoria, eu pergunto a mim mesma se é verdadeira desse modo". Entretanto, Einstein estava certo, tinha que ter a teoria. Seu maior desafio era explicar o espaço-tempo e gravidade de uma maneira geral, colocada em uma linguagem simples.

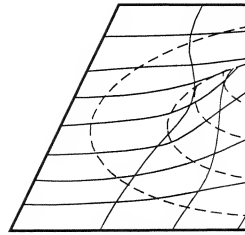
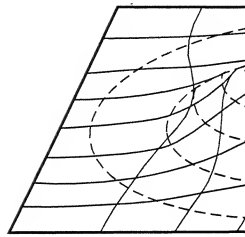
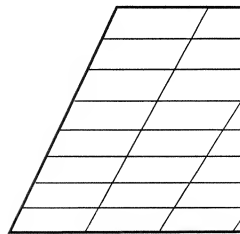
Einstein levaria oito anos para fundamentar sua intuição com a teoria da relatividade geral. Durante esse período, e em períodos em que seus cálculos levaria Einstein à beira de uma crise de sua frustração são reveladas para os amigos durante esse período. Ele precisava me ajudar ou eu vou trabalhar na relatividade era

Por exemplo, Newton diria que uma maçã caiu no solo porque existia uma força de atração gravitacional mútua, mas Einstein agora sentia ter um entendimento profundo do que provocava esta atração: a maçã simplesmente caía no solo porque estava caindo no fosso profundo no espaço-tempo provocado pela massa da Terra.

A presença de objetos no espaço-tempo dá origem a um relacionamento de mão dupla. A forma do espaço-tempo influencia o movimento dos objetos, e, ao mesmo tempo, esses mesmos objetos influenciam a forma do espaço-tempo. Em outras palavras, as concavidades no espaço-tempo que guiam o Sol e as planetas são causadas pelo mesmo Sol e pelas planetas. John Wheeler, um dos principais relativistas gerais do século XX, resumiria a teoria com o dito: "A matéria diz ao espaço como se curvar; e o espaço diz à matéria como se mover". Embora Wheeler tivesse sacrificado a precisão pela concisão ("espaço" deveria ser "espaço-tempo"), ainda é um bom resumo da teoria de Einstein.

Essa noção de espaço-tempo flexível pode parecer maluca, mas Einstein estava convencido de que era certa. De acordo com seu próprio conjunto de critérios estéticos, o elo entre o espaço-tempo flexível e a gravidade tinha de ser verdadeiro, ou, como Einstein resumiu: "Quando estou julgando uma teoria, eu pergunto a mim mesmo se, caso eu fosse Deus, teria feito o mundo desse modo". Entretanto, Einstein precisava convencer o resto do mundo de que estava certo, tinha que desenvolver uma fórmula que englobasse sua teoria. Seu maior desafio era transformar uma noção um tanto vaga de espaço-tempo e gravidade descrita acima em uma teoria formal da relatividade geral, colocada em uma rigorosa estrutura matemática.

Einstein levava oito anos de árdua pesquisa teórica antes que pudesse fundamentar sua intuição com um argumento matemático detalhado e lógico. Durante esse período, enfrentou grandes obstáculos e teve que suportar perigos em que seus cálculos pareciam se desfazer. O esforço intelectual levava Einstein à beira de um colapso nervoso. Seu estado mental e o nível de sua frustração são revelados nos breves comentários que ele fez em cartas para os amigos durante esses anos. Ele implorou a Marcel Grossman: "Você precisa me ajudar ou eu vou ficar maluco!". A Paul Ehrenfest ele disse que trabalhava na relatividade era como suportar "uma chuva de fogo e enxofre".



dimensionais do espaço-tempo e uma de espaço. O diagrama representando o espaço vazio. Se um objeto como o Sol. A profundidade da depressão causada pelo Sol. O plano, que é demasiado pequena para relativamente leve.

Em outra carta, ele se afligia por “novamente ter perpetrado alguma coisa na teoria da gravitação que me arrisca a ser confinado num hospício”.

A coragem necessária para essa aventura em território intelectual não mapeado não deve ser subestimada. Em 1913, Max Planck aconselhou Einstein a não trabalhar na relatividade geral. “Como um velho amigo eu devo aconselhá-lo contra isso, primeiro porque não terá sucesso e, se tiver, ninguém acreditará em você.”

Einstein perseverou, suportou a provação e finalmente completou sua teoria da relatividade geral em 1915. Como Newton, Einstein por fim desenvolveu uma fórmula matemática para explicar e calcular a força da gravidade em todas as situações concebíveis, mas a fórmula de Einstein era bem diferente e montada sobre uma premissa completamente independente — a existência do espaço-tempo flexível.

A teoria da gravidade de Newton fora suficiente para a física dos dois séculos anteriores, assim, por que os físicos deveriam abandoná-la subitamente em troca da nova teoria de Einstein? A teoria de Newton podia prever com sucesso o comportamento de tudo, de maçãs a planetas, de balas de canhão a gotas de chuva, assim, para que servia a teoria de Einstein?

A resposta se encontra na natureza do avanço científico. Os cientistas tentam criar teorias para explicar e prever os fenômenos naturais de modo tão preciso quanto possível. Uma teoria pode funcionar satisfatoriamente durante alguns anos, décadas ou séculos, mas os cientistas acabam desenvolvendo e adotando uma teoria melhor, uma que seja mais precisa, que funcione em uma variedade maior de situações, ou que explique fenômenos antes inexplicados. Foi o que aconteceu com os antigos astrônomos e seu entendimento da posição da Terra no cosmos. Inicialmente os astrônomos acreditavam que o Sol orbitava uma Terra estacionária, e graças aos epíclis e deferentes de Ptolomeu, esta era uma teoria razoavelmente bem-sucedida. De fato, os astrônomos a utilizavam para prever os movimentos dos planetas com uma precisão razoável. Contudo, a teoria centrada na Terra acabou sendo substituída por uma teoria do universo centrado no Sol, porque esta nova teoria, baseada nas órbitas elípticas de Kepler, era mais precisa e podia explicar as novas observações telescópicas, como as fases de Vênus. Foi uma transição longa e difícil de uma teoria para a ou-

tra, mas, uma vez que havia caminho de volta

Do mesmo modo, a teoria da gravidade particular, Einstein suspeitava de falhar em determinadas situações, mas a teoria seria verdadeira em todas as situações. Einstein tentou testar ambas, mas a realidade deu a vitória para a verdadeira teoria da gravidade.

O problema para Einstein era o mesmo nível de gravidade. Ele sabia que as teorias eram igualmente bem-sucedidas, mas ele percebeu que a teoria de Newton não podia explicar o movimento de Mercúrio, de modo a encontrar as falhas na teoria de Newton. Um tremendo campo de batalha se abriu. Mercúrio, sentia os efeitos da atração do Sol de um modo que não podia ser explicado com a sua. Em 18 de maio de 1859 precisava — um caso de anomalias havia décadas.

Em 1859, o astrônomo alemão descobriu uma anomalia na órbita de Mercúrio. Em vez de ser fixa, a órbita de Mercúrio era elíptica e espiralada. A órbita elíptica de Mercúrio era espirográfica. O movimento de Mercúrio percorrer es-

Os astrônomos tinham

tra, mas, uma vez que a teoria centrada no Sol se mostrara correta, não havia caminho de volta.

Do mesmo modo, Einstein acreditava estar fornecendo à física uma teoria melhor da gravidade, mais precisa e mais próxima da realidade. Em particular, Einstein suspeitava que a teoria da gravidade de Newton poderia falhar em determinadas circunstâncias enquanto sua própria teoria seria bem-sucedida em todas as situações. De acordo com Einstein, a teoria de Newton daria resultados incorretos ao prever fenômenos em situações em que a força da gravidade seria extremamente forte. Portanto, de modo a provar que estava certo, Einstein tinha apenas que encontrar um desses cenários extremos e testar ambas, a sua teoria da gravidade e a de Newton. A teoria que imitasse a realidade de modo mais preciso venceria a competição e seria a verdadeira teoria da gravidade.

O problema para Einstein é que todos os cenários terrestres envolviam o mesmo nível de gravidade medíocre e, nessas condições, ambas as teorias eram igualmente bem-sucedidas e davam resultados iguais. Consequentemente, ele percebeu que teria que se voltar para além da Terra, para o espaço, de modo a encontrar um ambiente de gravidade extrema que pudesse expor as falhas na teoria de Newton. Em especial, ele sabia que o Sol tinha um tremendo campo gravitacional e que o planeta mais próximo do Sol, Mercúrio, sentiria os efeitos dessa alta atração gravitacional. Ele se perguntava se a atração do Sol era forte o bastante para fazer Mercúrio se comportar de um modo que fosse incompatível com a teoria de Newton e de acordo com a sua. Em 18 de novembro de 1915, Einstein encontrou o teste de que precisava — um caso de comportamento planetário que intrigava os astrônomos havia décadas.

Em 1859, o astrônomo francês Urbain Le Verrier tinha analisado uma anomalia na órbita de Mercúrio. O planeta tinha uma órbita elíptica, mas, em vez de ser fixa, a elipse girava em torno do Sol, como mostrado na figura 24. A órbita elíptica gira em torno do Sol, trazendo um clássico padrão espirográfico. O movimento é muito pequeno, chegando a 574 segundos de arco por século, e leva 1 milhão de órbitas, ou mais de 200 mil anos, para Mercúrio percorrer esse ciclo e voltar a sua orientação orbital original.

Os astrônomos tinham presumido que o comportamento peculiar de

r perpetrado alguma coisa na

nado num hospício”.

13, Max Planck aconselhou
“Como um velho amigo eu
e não terá sucesso e, se tiver,

e finalmente completou sua
Newton, Einstein por fim de-
icar e calcular a força da gra-
fórmula de Einstein era bem
pletamente independente — a

iciente para a física dos dois
levariam abandoná-la subita-
teoria de Newton podia pre-
magas a planetas, de balas de

ia a teoria de Einstein?

Os cientistas
fenômenos naturais de modo
e funcionar satisfatoriamente
s os cientistas acabam desen-
na que seja mais precisa, que
es, ou que explique fenôme-
com os antigos astrônomos e
mos. Inicialmente os astrôno-
rra estacionária, e graças aos
na teoria razoavelmente bem-
a para prever os movimentos
ntudo, a teoria centrada na
ria do universo centrado no
bitas elípticas de Kepler, era
vações telescópicas, como as
fácil de uma teoria para a ou-

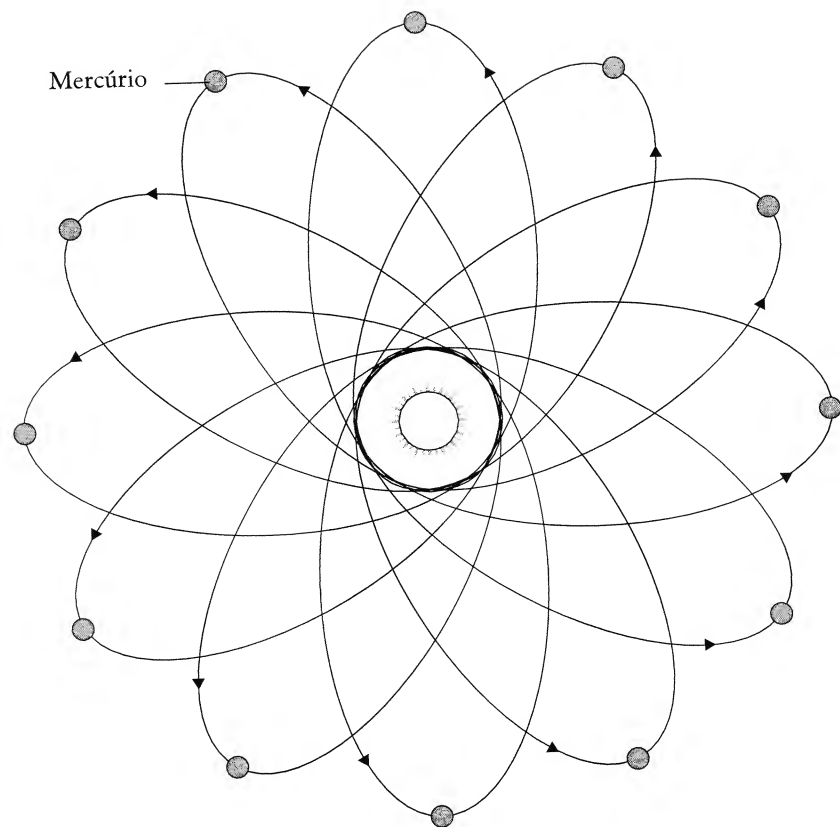


Figura 24 Os astrônomos do século XIX ficaram intrigados com um desvio da órbita de Mercúrio. Este é um diagrama exagerado, já que a órbita de Mercúrio é menos elíptica (ou seja, mais circular) e o Sol está mais perto do centro da órbita. E, o que é mais importante, a torção da órbita foi exagerada. Na realidade, cada órbita avança apenas $0,00038^\circ$ em relação à anterior. Quando lidam com ângulos muito pequenos, os cientistas usam minutos e segundos em lugar de graus:

$$1 \text{ minuto} = 1/60^\circ$$

$$1 \text{ segundo} = 1/60 \text{ minuto} = 1/3.600^\circ$$

Assim, cada órbita de Mercúrio avança aproximadamente $0,00038^\circ$ ou $0,023$ minutos, ou 1.383 segundos com relação à órbita anterior. Mercúrio leva 88 dias para orbitar o Sol, assim, depois de um século na Terra, Mercúrio completa 415 órbitas e sua órbita avançou de $415 \times 1.383 = 574$ segundos.

Mercúrio era causado pela atração do sistema Solar dando puxões extras devido à gravidade de Newton, Le Verrier e outros planetas explicava apenas 5 segundos de anomalia a cada século. Isso era inexplicado. De acordo com a relatividade extra, invisível na órbita de Mercúrio, a existência de um planeta invisível que ficaria entre Mercúrio e o Sol, sugeriram que a fórmula da gravidade devia estar na incapacidade de explicar os fenômenos envolvidos. Assim que tivessem descoberto, a lua ou o planeta X, a resposta certa de 574 segundos.

Einstein, por sua vez, tentou explicar a lua ou cinturão de asteróides com a fórmula da gravidade de Newton, mas Einstein estava pensando em termos de descrição da Terra, mas Einstein estava pensando em termos extremas encontradas nas previsões da gravidade de Newton. Esta teoria das duas teorias rivais e Einstein precisava a mudança na órbita.

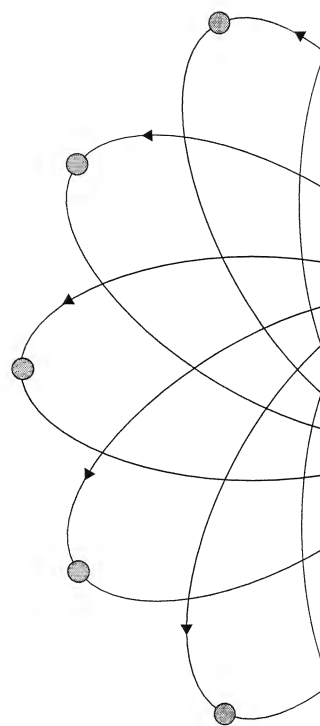
Fez os cálculos necessários e descobriu que foram 574 segundos de anomalia. “Por alguns dias eu fiquei convencido de que estava certo.”

Por azar, a comunidade científica com os cálculos de Einstein não estava convencida, como já vimos, por razões emocionais. Se uma teoria tem que ser abandonada, a teoria de Newton conciliava com a nova teoria.

Mercúrio era causado pela atração gravitacional dos outros planetas do Sistema Solar dando puxões em sua órbita. Mas, quando usou a fórmula da gravidade de Newton, Le Verrier descobriu que o efeito combinado dos outros planetas explicava apenas 53,1 dos 574 segundos de arco da torção que acontecia a cada século. Isso significava que 43 segundos de arco ficavam inexplicados. De acordo com alguns estudiosos, devia haver uma influência extra, invisível na órbita de Mercúrio, como por exemplo um cinturão interior de asteroídes ou uma lua desconhecida de Mercúrio. Alguns até mesmo sugeriram a existência de um planeta ainda não descoberto, chamado Vulcano, que ficaria entre Mercúrio e o Sol. Em outras palavras, os astrônomos presumiram que a fórmula da gravidade de Newton estava correta e que o problema devia estar na incapacidade deles de considerar todos os fatores envolvidos. Assim que tivessem encontrado o cinturão de asteroídes desconhecido, a lua ou o planeta, eles esperavam refazer os cálculos e obter a resposta certa de 574 segundos de arco.

Einstein, por sua vez, tinha certeza de que não existia nenhum planeta, lua ou cinturão de asteroídes desconhecido, e que o problema estava na fórmula da gravidade de Newton. A teoria de Newton funcionava perfeita-mente em termos de descrever o que acontecia na gravidade mais fraca da Terra, mas Einstein estava convencido de que as condições gravitacionais extremas encontradas nas proximidades do Sol estavam fora da área de seguranga de Newton. Esta era a arena perfeita para a competição entre as duas teorias rivais e Einstein esperava que sua própria teoria explicasse com precisão a mudança na órbita de Mercúrio.

Fez os cálculos necessários usando sua própria fórmula e o resultado foram 574 segundos de arco, o que estava de acordo com as observações. “Por alguns dias eu fiquei fora de mim com a alegria e a excitação”, escreveu. Por azar, a comunidade científica não estava inteiramente convencida com os cálculos de Einstein. As instituições científicas são inerentemente conservadoras, como já vimos, em parte por motivos práticos e em parte por razões emocionais. Se uma nova teoria derrubar uma antiga, a velha teoria tem que ser abandonada, e o que resta da estrutura científica tem que se conciliar com a nova teoria. Tal comogão só se justifica se a comunidade



rigados com um desvio da órbita de órbita de Mercúrio é menos elíptica centro da órbita. E, o que é mais aliidade, cada órbita avança apenas ângulos muito pequenos, os cientis-

$$\gamma = 1/3.600^\circ$$

mente 0,00038° ou 0,023 minutos, círculo leva 88 dias para orbitar o completa 415 órbitas e sua órbita

estiver plenamente convencida de que a nova idéia de fato funciona. Em outras palavras, o ônus da prova sempre fica com os advogados da nova teoria. A barreira emocional contra a aceitação é igualmente alta. Os velhos cientistas, que tinham passado suas vidas acreditando em Newton, estavam naturalmente relutantes em descartar aquilo que conheciam e em que confiavam em troca de alguma teoria recém-chegada. Mark Twain fez uma observação perspicaz ao dizer: "Um cientista jamais mostra afeição por uma teoria que ele mesmo não tenha apresentado".

Não surpreende que a comunidade científica se agarrasse à visão de que a fórmula de Newton estava certa e de que os astrônomos cedo ou tarde descobririam algum novo corpo celeste que explicaria o desvio orbital de Mercúrio. Quando uma observação mais precisa não revelou nenhum sinal de um cinturão de asteróides interior, ou de uma lua ou planeta, os astrônomos então ofereceram outra solução para salvar a agonizante teoria de Newton. Fazendo uma pequena mudança na equação de Newton de r^2 para $r^{2,00000016}$, eles poderiam de certa forma salvar a abordagem clássica e explicar a órbita de Mercúrio:

$$F = \frac{G \times m_1 \times m_2}{r^{2,00000016}}$$

Isso contudo era apenas um truque matemático. Sem respaldo na física, tratava-se de um esforço desesperado para salvar a teoria da gravidade de Newton. De fato, tais manipulações eram um sinal do tipo de lógica desligada da realidade que antes levara Ptolomeu a acrescentar mais círculos à visão equivocada do universo centrado na Terra e cheio de epiciclos.

Se ia superar esse conservadorismo, vencer seus críticos e depor Newton, Einstein tinha que reunir mais provas a favor de sua teoria. Precisava encontrar outro fenômeno que pudesse ser explicado apenas pela sua teoria e não pela de Newton. Alguma coisa tão extraordinária que fornecesse uma prova irrefutável e inequívoca a favor da gravidade de Einstein, da relatividade geral e do espaço-tempo.

Se uma nova teoria científica passasse por testes críticos. Primeiramente, ela deveria corresponder a todas as observações gravitacionais de Einstein. A primeira coisa que Einstein tinha indicado exatamente era o movimento de Mercúrio. O segundo teste seria prever os resultados de observações que os cientistas fizeram essas observações, então esta será uma observação. Quando Kepler e Galileu quiseram passar rapidamente por testes teóricos que correspondiam às observações. Contudo, o segundo teste seria prever as fases de Vênus corretamente há décadas.

O motivo pelo qual os cientistas vencer os incrédulos é claro, é gerar o resultado certo. Ela concorde com o resultado. Imagine que você está pensando em Alice. Ambos afirmam ter o mesmo resultado. Bob tenta convencê-lo de que o mercado de ontem, e é uma cotação com perfeição. o mercado amanhã. E 2. Com quem você vai investir? é claro, a suspeita de que os resultados do dia anterior a teoria não é inteiramente o comportamento do mercado realmente.

idéia de fato funciona. Em com os advogados da nova é igualmente alta. Os velhos litando em Newton, estavam ue conheciam e em que con- da. Mark Twain fez uma ob- nais mostra atêção por uma ca se agarrasse à visão de que os astrônomos cedo ou tarde explicaria o desvio orbital de sa não revelou nenhum sinal a lua ou planeta, os astrôno- alvar a agonizante teoria de quação de Newton de r^2 para abordagem clássica e explicar

c. Sem respaldo na física, tra- ar a teoria da gravidade de nal do tipo de lógica desligada iscentar mais círculos à visão neio de epículos.

seus críticos e depor Newton, e sua teoria. Precisava encon- apenas pela sua teoria e não ria que fornecesse uma prova de Einstein, da relatividade

A parceria decisiva Teoria e experiência

Se uma nova teoria científica quer ser levada a sério, precisa passar por dois testes críticos. Primeiro, precisa produzir resultados teóricos que correspondam a todas as observações existentes da realidade. A teoria gravitacional de Einstein tinha passado por esse teste, porque entre outras coisas tinha indicado exatamente a quantidade certa de desvio na órbita de Mercúrio. O segundo teste, que é ainda mais rígido, é de que a teoria deve prever os resultados de observações que ainda não foram feitas. Quando os cientistas fizerem essas observações, se elas corresponderem às previsões teóri- cas, então esta será uma evidência determinante de que a teoria é correta. Quando Kepler e Galileu afirmaram que a Terra orbitava o Sol, eles conse- guiram passar rapidamente no primeiro teste, que era produzir resultados teóricos que correspondessem aos movimentos conhecidos dos planetas. Contudo, o segundo teste só foi vencido quando as observações de Galileu das fases de Vênus corresponderam à previsão teórica feita por Copérnico há décadas.

O motivo pelo qual o primeiro teste sozinho não é suficiente para con- vencer os incrédulos é o medo de que a teoria tenha sido ajustada para gerar o resultado certo. Contudo, é impossível ajustar uma teoria para que ela concorde com o resultado de uma observação que ainda não foi feita. Imagine que você está pensando em investir seu dinheiro com Bob ou com Alice. Ambos afirmam ter sistemas perfeitos para jogar no mercado de ações. Bob tenta convencê-lo de que a sua teoria é melhor mostrando as cotações do mercado de ontem, e então revela como a sua teoria teria previsto aquelas cotações com perfeição. Alice, por outro lado, mostra suas previsões para o mercado amanhã. E 24 horas depois fica provado que ela estava certa. Com quem você vai investir o seu dinheiro, com Bob ou com Alice? Existe, é claro, a suspeita de que Bob possa ter ajustado sua teoria para corresponder aos resultados do dia anterior, depois de o pregão terminar. Assim sua teoria não é inteiramente convincente. Mas a teoria de Alice, ao prever o comportamento do mercado de ações com antecedência, parece funcionar realmente.

De modo semelhante, se Einstein ia provar que estava certo e que Newton estava errado, ele teria que usar sua teoria para fazer uma previsão firme sobre um fenômeno ainda não observado. É claro que este fenômeno teria que acontecer num ambiente de gravidade extrema, de outro modo as previsões newtonianas e einsteinianas coincidiriam e não haveria vencedor.

No final, o teste decisivo seria um fenômeno envolvendo o comportamento da luz. Antes mesmo de aplicar sua teoria a Mercúrio — de fato, mesmo antes de terminar o desenvolvimento de sua teoria da relatividade geral —, Einstein tinha começado a explorar a interação entre a luz e a gravidade. De acordo com a sua formulação da gravidade no espaço-tempo, qualquer raio de luz que passasse por uma estrela ou um planeta maciço seria atraído pela força gravitacional em direção a essa estrela ou a esse planeta, e a luz seria levemente desviada de sua trajetória original. A teoria da gravidade de Newton também previa que objetos pesados poderiam curvar a luz, mas numa extensão menor. Conseqüentemente, se alguém pudesse medir o desvio da luz por um corpo celeste maciço, o resultado, se o desvio era pequeno ou muito pequeno, determinaria quem estava certo, Einstein ou Newton.

Já em 1912, Einstein começara uma colaboração com Erwin Freundlich sobre como fazer a medida crucial. Enquanto Einstein era físico teórico, Freundlich era um astrônomo profissional e portanto se encontrava em posição melhor para dizer como alguém poderia fazer observações que detectassem o desvio óptico previsto pela relatividade geral. Inicialmente, eles se perguntaram se Júpiter, o planeta mais denso do Sistema Solar, poderia ser grande o suficiente para curvar a luz de uma estrela distante, como mostrado na figura 25. Mas, quando Einstein fez os cálculos, usando sua fórmula, ficou claro que o desvio causado por Júpiter seria muito tênue para ser detectado, ainda que o planeta tenha trezentas vezes a massa da Terra. Einstein escreveu para Freundlich: “Se ao menos a natureza nos desse um planeta maior do que Júpiter!”

Em seguida eles se voltaram para o Sol, que é mil vezes mais denso do que Júpiter. Dessa vez os cálculos de Einstein mostraram que a atração gravitacional do Sol teria uma influência significativa sobre um raio de luz de uma estrela distante e que a curvatura da luz seria detectável. Por exem-



Figura 25 Einstein estava em um planeta maciço o suficiente para cruzar o espaço-tempo. O diagrama cruza o espaço. A trajetória plana se Júpiter não estivesse pela torção espacial de Júpiter é muito pequeno para

plano, se a estrela estivesse na linha de visão, nós não a veríamos. Contudo, a imensa curvatura do espaço-tempo desviariam a luz da estrela, que ainda estaria na posição real para indicar quem estava certo. O desvio ainda menor que o de Júpiter.

Mas há um problema: a luz não pode aparecer bem no modo de brilho do Sol. De fato, as estrelas, mas todas parecem pequenas comparadas ao do Sol. Contudo, o Sol se revelam. Em outras palavras, que eles procurassem pe-

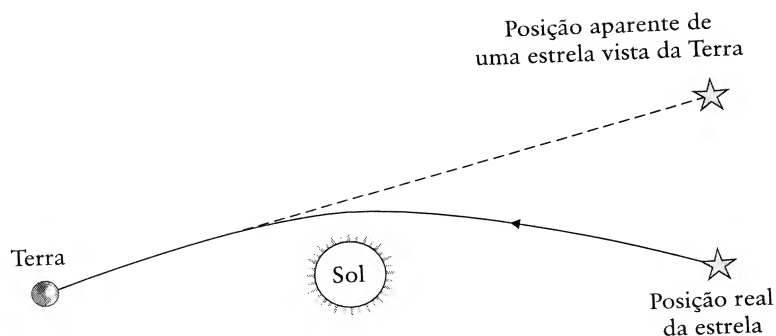


Figura 26 Einstein esperava que a curvatura da luz estelar pelo Sol pudesse ser usada para comprovar sua teoria da relatividade geral. A linha de mira entre a Terra e a estrela distante é bloqueada pelo Sol, mas a massa do Sol distorce o espaço-tempo e a luz estelar é desviada para seguir uma trajetória curva em direção à Terra. Nosso instinto nos diz que a luz viaja em linha reta, assim, da Terra, nós projetamos a trajetória da luz de volta ao longo da linha reta que ela deve ter percorrido e parece que a estrela mudou de posição. A teoria da gravidade de Einstein previa um desvio estelar aparente maior do que o previsto pela teoria da gravidade de Newton, assim, a medição do desvio indicaria qual teoria da gravidade era a correta.

Quando a Lua tapa o Sol durante um eclipse, o dia temporariamente se transforma em noite e as estrelas aparecem. O disco da Lua se encaixa sobre o do Sol tão perfeitamente que é possível identificar uma estrela a apenas uma fração de grau da borda do Sol — ou melhor, uma estrela cuja luz foi desviada de modo que ela *parece* estar uma fração de grau fora do disco solar.

Einstein esperava que Freundlich pudesse examinar fotografias de eclipses passados para encontrar as mudanças nas posições necessárias que provassem sua fórmula da gravidade, mas logo ficou claro que dados de segunda mão não seriam suficientes. A exposição e o enquadramento das fotos teriam que ser perfeitos para detectar pequenas mudanças nas posições das estrelas, e as fotografias de eclipses passados não correspondiam às expectativas.

Havia apenas uma opção. Freundlich teria que montar uma expedição para fotografar o próximo eclipse solar, que seria observável da Criméia em 21 de agosto de 1914. A reputação de Einstein dependia dessa observação,

por isso ele estava preparado. Ficou tão obcecado correndo e depois comendo cálculos com o parceiro, que cometeu erros. Mais tarde, a viúva, já que elas teriam vivido...

Freundlich partiu de Berlim. Sabemos agora que foi um fracasso. O cisco Ferdinando tinha previsto que eventos que levariam à queda de Berlim. Quando Freundlich chegou à Rússia, seus telescópios para o eclipse não funcionaram. A Alemanha tinha declarado a guerra e os alemães carregando telescópios naquela ocasião estavam prontos para a guerra e sua equipe tinham sido desmontados. As coisas, eles foram desmontados, um fracasso completo. Foi organizado um grupo de oficiais para uma troca de prisioneiros em Berlim, no dia 2 de setembro.

Essa iniciativa malsucedida atrasou o avanço na física e a guerra pura parou, já que toda a Alemanha, e muitas das jovens, foram como voluntários para a guerra que já era um nome para fazer parte de uma das batalhas de navio para Galípoli aliadas que atacavam as condições em Galípoli: mosquitos, mas moscas na comida". Ao alvorecer, começaram um ataque que...

por isso ele estava preparado para financiar a missão, se fosse necessário. Ficou tão obcecado com isso que ia jantar na casa de Freundlich, comia correndo e depois começava a escrever na toalha da mesa, checando seus cálculos com o parceiro para ter certeza de que não havia margem para erros. Mais tarde, a viúva de Freundlich lamentou ter lavado aquelas toa-lhas, já que elas teriam valido uma fortuna com os rabiscos de Einstein intactos. Freundlich partiu de Berlim com destino à Criméia no dia 19 de julho. Sabemos agora que foi uma atitude imprudente, porque o arquiduque Fran-cisco Ferdinando tinha sido assassinado em Sarajevo no mês anterior, e os eventos que levariam à Primeira Guerra Mundial estavam acontecendo. Freundlich chegou à Rússia com bastante tempo disponível para aprontar seus telescópios para o dia do eclipse, ao que tudo indica ignorando que a Alemanha tinha declarado guerra à Rússia enquanto ele viajava. E cidadãos alemães carregando telescópios e equipamento fotográfico pela Rússia na-que-la ocasião estavam procurando encrenca. Não surpreende que Freundlich e sua equipe tenham sido presos sob suspeita de espionagem. E, para piorar as coisas, eles foram detidos antes do eclipse, de modo que a expedição foi um fracasso completo. Felizmente para Freundlich, a Alemanha tinha apris-ionado um grupo de oficiais russos na mesma ocasião, assim foi combinada uma troca de prisioneiros, e Freundlich estava em segurança, de novo em Berlim, no dia 2 de setembro.

Essa iniciativa malsucedida simbolizou o modo como a guerra iria para-lisar o avanço na física e na astronomia nos quatro anos seguintes. A ciência pura parou, já que toda a pesquisa foi focalizada em meios de vencer a guer-ra, e muitas das jovens mentes brilhantes da Europa se apresentaram como voluntários para lutar por seus países. Harry Moseley, por exemplo, que já era um nome famoso na física atômica em Oxford, se ofereceu para fazer parte de uma das divisões do Novo Exército de Kitchener. Ele foi man-dado de navio para Galípoli, no verão de 1915, para juntar-se às forças aliadas que atacavam o território turco. Em carta à mãe, ele descreveu as condições em Galípoli: "O único interesse real na vida são as moscas. Não mosquitos, mas moscas de dia e moscas de noite, moscas na água e moscas na comida". Ao alvorecer do dia 10 de agosto, 30 mil soldados turcos ini-ciam um ataque que resultou nos mais violentos combates à baioneta de

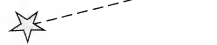
que montar uma expedição a observável da Criméia em o correspondiam às espec-mudanças nas posições das quadramento das fotos te-claro que dados de segunda posições necessárias que pro-aminar fotografias de eclipsção de grau fora do disco

o dia temporariamente se sco da Lua se encaixa sobre rificar uma estrela a apenas rior, uma estrela cuja luz foi

Posição real
da estrela



Posição aparente de
a estrela vista da Terra



toda a guerra. Quando o assalto terminou, Moseley estava morto. Até mesmo a imprensa alemã lamentou sua morte, classificando-a como “uma perda cruel” (*ein schwerer Verlust*) para a ciência.

De modo semelhante, Karl Schwarzschild, diretor do Observatório de Potsdam, na Alemanha, também se ofereceu para lutar por seu país. Ele continuou a escrever trabalhos científicos enquanto estava preso nas trincheiras, incluindo um sobre a teoria da relatividade geral de Einstein, que mais tarde levou à compreensão dos buracos negros. No dia 24 de fevereiro de 1916, Einstein apresentou o trabalho à Academia Prussiana. E quatro meses depois Schwarzschild estava morto. Tinha contraído uma doença fatal na frente oriental.

Enquanto Schwarzschild se apresentava para lutar, seu equivalente no Observatório de Cambridge, Arthur Eddington, recusou-se a se alistar, com base em princípios religiosos. Educado como um quacre devoto, Eddington deixou clara sua posição: “Minha objeção à guerra é baseada em princípios religiosos... Mesmo se a abstenção dos opositores conscienciosos fizer a diferença entre a vitória ou a derrota, nós não podemos verdadeiramente beneficiar a nação com a desobediência obstinada à vontade divina”. Os colegas de Eddington apelaram para que ele fosse excluído do serviço militar com o argumento de que ele era mais valioso para o país como cientista, mas o Ministério do Interior rejeitou a petição. Parecia inevitável que a postura de Eddington como opositor consciencioso o levaria para um campo de prisioneiros.

Então Frank Dyson, o astrônomo real, veio salvá-lo. Dyson sabia que haveria um eclipse total do Sol no dia 29 de maio de 1919, e que aconteceria junto a um rico aglomerado de estrelas conhecido como as Híades — um excelente cenário para medir qualquer desvio gravitacional da luz. A trilha do eclipse cruzava a América do Sul e a África Central, de modo que fazer as observações implicaria montar uma grande expedição aos trópicos. Dyson sugeriu ao almirantado que Eddington poderia servir ao seu país organizando e liderando tal expedição, e, enquanto isso, ele deveria permanecer em Cambridge para prepará-la. Dyson apelou para o patriotismo, sugerindo que era dever de um cidadão inglês defender a gravidade de Newton contra a teoria germânica da relatividade geral. Em seu coração e em sua mente, Dyson

era pró-Einstein, mas ele esquivava-se das pressões políticas e das dificuldades. Sua campanha de Eddington recebeu permissão para preparar tudo para o eclipse.

De fato, Eddington era um homem muito inteligente. Ele passara toda a vida, desde a idade de quatro anos, olhando para o céu. Tornou-se um aluno brilhante na Universidade de Cambridge, ganhando uma das mais altas distinções. E mantinha-se amigo de muitos dos colegas. Como pesquisador da relatividade geral, e no devotamento à ciência, que Einstein elogia em qualquer idioma”. Eddington foi acompanhado por Ludwig Silberstein, que também era um astrônomo de grande reputação. Uma vez disse para as pessoas no mundo que com ele não havia nada a se fazer, olhando em silêncio, até que ele falasse. “Pelo contrário”, respondeu a terceira pessoa.

Além de ser intelectual, Eddington era um homem muito corajoso. Ele queria liderar uma expedição para sobreviver aos rigores de uma expedição astronômica. Ele levou os cientistas aos seus locais de observação. O cientista francês Jean d'Alembert, que observou o planeta Vênus por 1761, ele foi para a Sibéria porque a população local a tinha apontado para o Sol e a primavera, que tinham acontecido suas observações do trânsito de Vênus, mas a febre matou D'Alembert, deixando apenas um sobrevivente.

era pró-Einstein, mas ele esperava que esse subterfúgio convencesse as autoridades. Sua campanha deu certo. A ameaça de prisão foi esquecida e Eddington recebeu permissão para continuar trabalhando no observatório, preparando tudo para o eclipse de 1919.

De fato, Eddington era o homem perfeito para verificar a teoria de Einstein. Ele passara toda a vida fascinado pela matemática e pela astronomia, desde a idade de quatro anos, quando tentara contar todas as estrelas do céu. Tornou-se um aluno brilhante, ganhando uma bolsa de estudos na Universidade de Cambridge, onde foi o melhor aluno do ano, recebendo a mais alta distinção. E manteve sua reputação graduando-se um ano antes dos colegas. Como pesquisador, ficou bem conhecido como defensor da relatividade geral, e no devido tempo escreveria *A teoria matemática da relatividade*, que Einstein elogiaria como “a melhor apresentação do assunto em qualquer idioma”. Eddington ficou tão associado com a teoria que o físico Ludwig Silberstein, que também se considerava uma autoridade em relatividade geral, uma vez disse para Eddington: “O senhor deve ser uma das três pessoas no mundo que compreendem a relatividade geral”. Eddington ficou olhando em silêncio, até que Silberstein lhe disse para não ser tão modesto. “Pelo contrário”, respondeu Eddington. “Estou tentando lembrar quem é a terceira pessoa.”

Além de ser intelectualmente bem dotado e possuir a confiança necessária para liderar uma expedição, Eddington também era forte o bastante para sobreviver aos rigores de uma aventura tropical. Isso era importante, porque as expedições astronômicas têm a reputação de serem jornadas árduas que levam os cientistas aos seus limites. No final do século XVIII, por exemplo, o cientista francês Jean d’Auteroche participou de duas expedições para observar o planeta Vênus passando sobre a face do Sol. Na primeira, em 1761, ele foi para a Sibéria, onde teve que ser protegido pelos cossacos, porque a população local achava que os estranhos equipamentos que ele tinha apontado para o Sol eram responsáveis pelas severas inundações da primavera, que tinham acontecido recentemente. Oito anos depois, ele repetiu suas observações do trânsito de Vênus na península Baja, no México, mas a febre matou D’Auteroche e dois membros de sua equipe logo depois, deixando apenas um sobrevivente para levar as preciosas medições para Paris.

eley estava morto. Até mes-

diretor do Observatório de o estava preso nas trinchei- geral de Einstein, que mais . No dia 24 de fevereiro de ia Prussiana. E quatro meses trado uma doença fatal na

ra lutar, seu equivalente no , recusou-se a se alistar, com n quacre devoto, Eddington erra é baseada em princípios tores conscienciosos fizer a) podemos verdadeiramente nada à vontade divina”. Ososse excluído do serviço mi- so para o país como cientis-ção. Parecia inevitável que aioso o levaria para um campo

io salvá-lo. Dyson sabia que io de 1919, e que aconteceria cido como as Híades — um gravitacional da luz. A trilha central, de modo que fazer as pedição aos trópicos. Dyson servir ao seu país organizan- , ele deveria permanecer em o patriotismo, sugerindo que avidade de Newton contra a oração e em sua mente, Dyson

Outras expedições eram menos perigosas para o corpo, porém mais exaustivas para a mente. Guillaume le Gentil, um dos colegas de D'Aueroche, também tinha planejado observar o trânsito de Vênus em 1761, mas viajou para Pondicherry, na Índia francesa, para testemunhar o evento. Quando chegou lá, os britânicos estavam em guerra contra os franceses, Pondicherry estava sitiada e Le Gentil não pôde desembarcar na Índia. Ele decidiu então se estabelecer em Maurício e ganhar a vida como comerciante enquanto esperava oito anos pelo trânsito de 1769. Desta vez ele conseguiu chegar a Pondicherry e desfrutou semanas de gloriosa luz solar nos dias anteriores ao trânsito, apenas para as nuvens aparecerem no momento crucial, obscurecendo completamente a visão. "Passei mais de duas semanas num estado de depressão", escreveu, "e quase não tinha coragem de pegar na pena para continuar meu diário. Várias vezes esta caiu de minhas mãos quando chegou a hora de relatar à França o destino de minha empreitada." Depois de uma ausência de 11 anos, seis meses e 13 dias, ele retornou para sua casa, na França, e descobriu que ela tinha sido saqueada. Mas conseguiu reconstruir sua vida escrevendo suas memórias, que se tornaram um grande sucesso comercial.

No dia 8 de março de 1919, Eddington e sua equipe deixaram Liverpool a bordo do HMS *Anselm* e se dirigiram para a ilha da Madeira, onde os cientistas se dividiram em dois grupos. Um grupo permaneceu a bordo do *Anselm* e viajou para o Brasil a fim de observar o eclipse em Sobral, no Ceará. Eddington e o segundo grupo embarcaram no cargueiro *Portugal* e foram para a ilha de Príncipe, em frente à costa da Guiné Equatorial, na África Ocidental. A idéia era de que, se as nuvens escondessem o eclipse no Brasil, talvez a equipe africana tivesse sorte, ou vice-versa. O clima decidiria o resultado das expedições, e assim ambas as equipes começaram a procurar um lugar ideal para a observação assim que chegaram aos seus destinos. Eddington usou um dos primeiros veículos com tração nas quatro rodas para explorar Príncipe, e afinal decidiu instalar seus equipamentos em Roca Sundy, um local elevado no noroeste da ilha, que parecia menos propenso ao céu nublado. Então a equipe passou a testar chapas fotográficas e a verificar equipamentos, garantindo que tudo estivesse perfeito para o grande dia.

As observações do eclipse foram feitas em Sobral e Príncipe. A luz das estrelas foi usada para medir a deflexão da gravidade de Newton. O resultado foi mais significativo de acordo com a relatividade geral do que se discordassem de ambas as teorias, pois ambas estariam erradas.

Einstein previa que a deflexão seria de 1,74 segundos de arco. As tolerâncias do equipamento de Eddington eram de 0,3 segundos por Newton. Esse desvio de 0,3 segundos de um quilômetro, movendo-se a 300 mil km/s, dá uma distância de 90 mil km.

À medida que o dia avançava, as nuvens começaram a se dissipar. Sobral foi o melhor lugar para a observação de Eddington. A Lua tocou a borda do Sol e as condições de observação foram perfeitas. Eddington registrou o eclipse. "A chuva cessou por volta das 10h30, quando a fase parcial do eclipse começou a iluminar o Sol e tivemos uma visão clara da fé. Eu nem vi o eclipse, mas as fotografias. Só dei uma olhada na outra espiada no meio da manhã."

A equipe de observação em Príncipe também montou suas câmeras, expostas por 1/100 de segundo. Eddington não conseguiu ver a meia-luz que tomara como uma confirmação pelos chamados dos observadores. O eclipse durou 302 segundos de totalidade.

Das 16 fotografias tiradas em Sobral, apenas duas foram aproveitadas por causa de fiapos de nuvens e do momento de céu claro foi perdido. Em seu livro *Espuma do Universo*, Eddington contou o que aconteceu com esta pre-

